

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

**Online řízení a monitoring klíčových motorů na
pecích**

**Online Control and Monitoring of Key Engines on
Furnaces**

Student: **Bc. Marek Foldyna**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum odevzdání: 21.05.2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Foldyna**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Online řízení a monitoring klíčových motorů na pecích**
Online Control and Monitoring of Key Engines on Furnaces
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce se zabývejte problematikou aplikace online diagnostiky na motorech umístěných na pecích. Rozeberte problematiku týkající se této aplikace, zvolte vhodná místa pro umístění snímačů. Popište přístrojovou techniku a softwarové nastavení pro tuto aplikaci. Proveďte potřebná měření, včetně vyhodnocení naměřených dat.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1. vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka*. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály firem - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN ISO 10 816 *Vibrace-Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Tato diplomová práce je v utajeném režimu.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2018

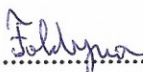
.....
Faldyma

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, dále jen („VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35, odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12, odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2018


.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Marek Foldyna

Adresa trvalého pobytu autora práce: Palkovice 823

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Blatovi, Ph.D. za pomoc v praktické části diplomové práce. Dále bych rád poděkoval svým blízkým za morální podporu.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

FOLDYNA, M. *Online řízení a monitoring klíčových motorů na pecích: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta Strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2018, 65 s. Vedoucí práce: Ing. Blata, J., Ph.D.

Jelikož se stroje neustále opotřebovávají, je třeba je udržovat ve funkčním stavu, aby správně a dlouhodobě pracovaly. Proto se v této diplomové práci budu zabývat, jakým způsobem lze zajistit online monitoring na klíčových motorech u pájecích pecí. Zaměření tedy bude na diagnostiku těchto motorů a v jakém jsou stavu. Tento diagnostický stav, který by mohl být snímán pravidelně nebo průběžně online, by sloužil jako zhodnocení pro současný stav motoru a jeho opotřebení, popřípadě ke kontrole běhu motoru. A následně navrhnout online monitoring systému, který by mohl být aplikován v praxi na měřené zařízení pro zkvalitnění údržby a prodloužení životnosti.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

FOLDYNA, M. *Online Control and Monitoring of Key Engines on Furnaces: Master Thesis,* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design , 2018, 65 p. Thesis head: Ing. Blata, J. Ph.D

Since machinery is always getting worn out, it needs to be kept in a functioning state, so that they have long lifetime and work correctly. That's what I am going to be dealing with in this thesis, in what ways there can be maintained online monitoring of key engines on furnaces. So the focus will be the diagnostics of these engines and what their current condition is. This diagnostic condition, which might be monitored regularly or continuously online, would serve as a benchmark for current condition of the engine and it's wear, eventually to check the running of an engine. And following with design of a online monitoring system, which could be applied in practice on the measured device to increase quality of maintenance and prolongation of lifetime.

Klíčová slova:

Online monitoring; elektro motor; pece; diagnostika;

Keywords:

Online monitoring; electric engine ; furnace; diagnostics;

Obsah

strana

Seznam použitých značek a symbolů.....	11
Úvod.....	12
1 Vibrodiagnostika	13
1.1 Snímače vibrací	13
1.2 Signál a jeho zpracování pomocí FFT	15
1.2.1 Algoritmus FFT	16
1.2.2 Měření a vyhodnocování spekter signálů.....	16
1.3 Zhodnocení vibrací, zásady volby měřících míst	16
2 Diagnostika závad	18
2.1 Statická, momentová a dynamická nevyváženost	18
2.2 Úhlová a osová nesouosost.....	20
2.3 Řemenové převody	23
2.4 Kluzná ložiska	23
2.5 Valivá ložiska	26
2.6 Metoda Kurtosis	29
2.7 Crest faktor	29
3. Vibrodiagnostika elektromotorů	32
3.1 Elektrické příčiny	33
3.2 Další závady elektromotorů.....	34
4 Online monitoring	36
4.1 Adash Online Monitoring systémy.....	37
4.2 Brüel Kjaer Online Monitoring Systémy.....	39
4.3 SKF Online Monitoring Systémy	41
4.4 Doporučený Online monitoring systém.....	43
5 Závěr.....	61
6 Seznam použité literatury	62

7 Seznam obrázků, tabulek a vzorců.....	63
8 Seznam příloh.....	65

Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Legenda	Jednotka
D	Průměr kola 1	[m]
KA	Metoda Kurtosis	[-]
L	Délka	[m]
P	Pravděpodobnost	[-]
f_B	Řemenová frekvence	[Hz]
f_{BZ}	Zubová frekvence řemene	[Hz]
f_{dyn}	Dynamická vzduchová mezera frekvence	[Hz]
f_{st}	Statická vzduchová mezera frekvence	[Hz]
f_R	Frekvence kola	[Hz]
i	Harmonické číslo	[-]
k_l	0, 2, 4, 6...	[-]
k_e	Stupeň excentricity	[-]
m	Počet drážek rotoru	[-]
n	Otáčky motoru	$[\text{min}^{-1}]$
n_1	Otáčky točivého pole statoru	$[\text{min}^{-1}]$
n_2	Otáčky točivého pole rotoru	$[\text{min}^{-1}]$
p	Počet pol párů	[-]
s	Skluz	[%]
x	Amplituda signálu	[-]
\bar{x}	Střední hodnota	[-]
z	Počet zubů	[-]
Řecká abeceda		
σ	Standardní odchylka vůči nulovému signálu	[-]

Úvod

Jak lze dle názvu diplomové práce vidět, bude se tato diplomová práce zabývat jakým způsobem a s jakou možností by se mohly online monitorovat a diagnostikovat klíčové motory na pájecích pecích. Jedná se o určení klíčových motorů z řady pecí, následného stanovení současného stavu motorů a vypracování měřicího protokolu. Na základě tohoto prvního měření se stanoví, ve kterých místech by bylo možno vhodně umístit snímače tak, aby bylo zajištěno dlouhodobé a přesné měření. Jakožto určení stavu motoru, bylo provedeno vizuální prověření vrchní části pece, kde byly motory s ventilátory umístěny. Dále se pomocí měřicí techniky na vibrodiagnostiku provedlo měření několika motorů spolu se čtyřmi různými místy umístění snímačů, pro co nejvhodnější měření. Navíc k tomuto měření bylo přidáno ještě termografické měření infračervenou kamerou pro teploty motorů za běhu s kontrolou pomocí dotykového teploměru.

Jakožto ideální podmínky pro zpracování by bylo při prvním měření zjistit současný stav motorů. Tento současný stav předat firmě, aby v případě špatných hodnot mohla zajistit správnou funkci motorů. Po vykonání úkonů by se provedlo druhé měření, jestli se po prvním měření zlepšily nebo zhoršily hodnoty. Podle tohoto měření by se stanovil konečný návrh online monitoringu. Popřípadě by se provedlo ještě třetí měření, pro kontrolu stavu.

Cíl práce:

Cílem práce je navrhnout jakým způsobem a na kterých klíčových motorech by šlo umožnit použití online monitoringu, ať už pravidelně v intervalech, nebo průběžně online.

1 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika je obor, který se zabývá měřením vibračních veličin na strojích s následným rozбором pro určení stavu a závad spojených s vibracemi na stroji. Dále se veličiny sledují kvůli předcházení závadám a včasnému naplánování nebo výměně poškozených součástí na stroji. Při běhu stroje s vysokými vibracemi se životnost daného stroje neustále zkracuje. Vinou vysokých vibrací mohou být např. nevývaha, nesouosost, špatná nebo narušená konstrukce, atd.

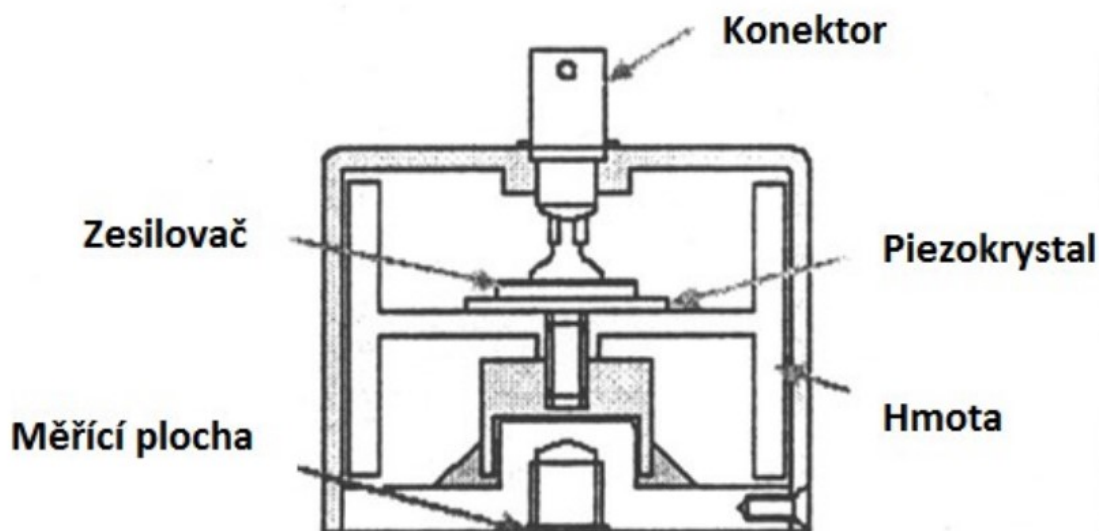
1.1 Snímače vibrací

Pro měření vibrací je třeba, aby měřený signál co nejvěrněji odpovídal skutečnému mechanickému kmitání. Proto se používají dva typy snímačů pro monitorování vibrací.

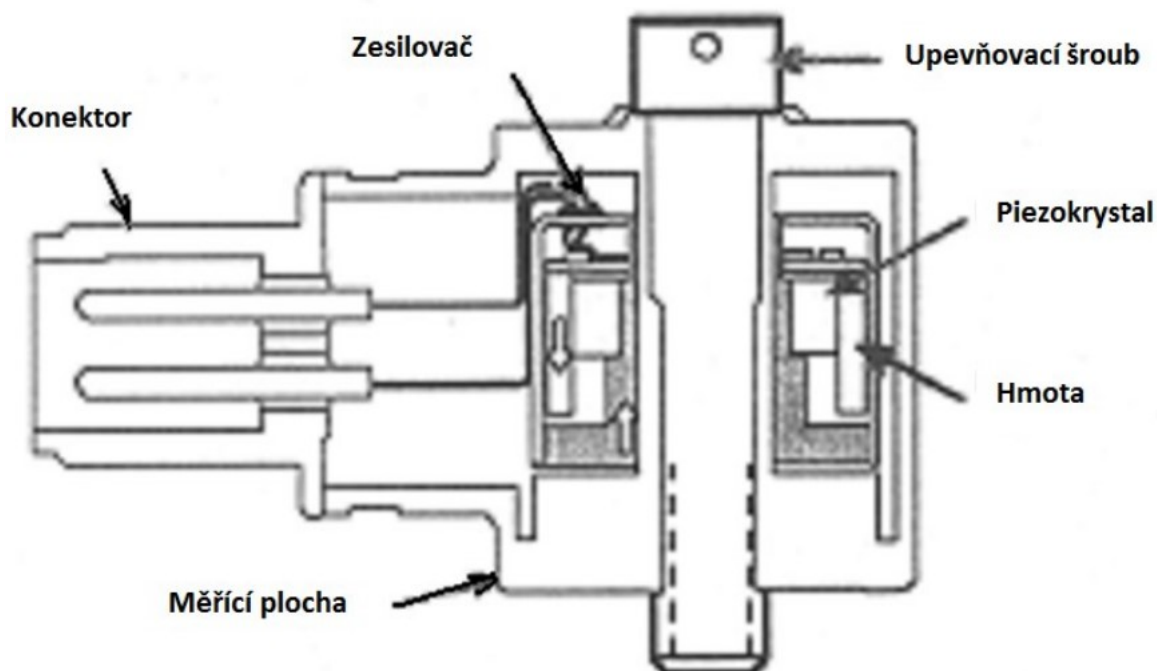
- **Seismická zařízení**, která jsou pevně namontována na stroji a jejich výstupem je míra absolutních vibrací

- **Snímače relativní výchylky**, které měří vibrační výchylku a střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy

Mezi nejpoužívanější snímače patří akcelerometry, jedná se o seismické zařízení, které generuje signál proporcionální mechanickému vibračnímu zrychlení tělesa. Výhodou akcelerometru je, že jeho výstupní signál si můžeme zpracovat tak, aby dal jakoukoliv veličinu. Princip akcelerometru je následující, jeden nebo několik piezoelektrických krystalů jsou umístěny uvnitř snímače. Tento piezoelektrický krystal generuje elektrický náboj úměrný síle stlačení. Podle umístění hmoty ve snímači se pak rozdělují na dva druhy: tlakový (obr.1) a smykový (obr.2).[9]



Obr.1 Tlakový akcelerometr¹⁰



Obr.2 Smykový akcelerometr¹⁰

Další používaný snímač je snímač rychlosti. Jedná se taktéž o seismické zařízení, které generuje napetový signál proporcionální mechanické vibrační rychlosti tělesa. Princip tohoto snímače spočívá v generování elektrického napětí. Vznik tohoto napětí je využit z pohybu cívky v poli permanentního magnetu.

Poslední používaný snímač je bezdotyková sonda. Výstupem je přímo úměrná výchylka vibrací mezi rotujícími a nerotujícími částmi stroje. Používá se u strojů, kde hmotnost konstrukce je mnohonásobně větší než hmotnost rotující části. Tyto snímače pracují na principu vířivých proudů. Cívka kterou prochází střídavé napětí generuje magnetické pole. Následné umístění vodivých materiálů do pole způsobí, že se v materiálu generují vířivé proudy.

Nedílnou součástí je upevnění snímače k měřenému zařízení. Pokud by se zvolilo špatného upevnění, mohlo by docházet k špatnému snímání veličin. A mohlo by dojít k nesprávnému zhodnocení výsledků. Což může mít za důsledek nesprávné operace se zařízením a případné zhoršení stavu od skutečného. Tímto problémem se zabývá norma ČSN ISO 5348.[9]

Tab.1 Vliv připevnění snímače⁹

Metoda připevnění	Vliv na výkonnost snímače
Pevný šroubový spoj	Žádné snížené rezonanční frekvence akcelerometru v důsledku připevnění
Izolovaný šroubový spoj	Při použití tuhého nevodivého materiálu, jako je podložka ze slídy, se montážní rezonanční frekvence snížila na 28kHz
Přilepení tuhým lepidlem	Rezonance je snížena asi na 28kHz
Přilepení měkkým lepidlem	Rezonance je snížena asi na 8kHz
Připevnění permanentním magnetem	Rezonance je snížena asi na 7kHz
Ruční sonda se snímačem	Rezonance je snížena asi na 2kHz, ale tato metoda není doporučena pro měření nad 1kHz

V našem případě bylo použito těchto snímačů:

Snímač vibrací ADASH A102-1A SN 1400

Snímač vibrací Hansford sensor HS 100 SN 298387

Snímač vibrací ADASH A104-1A SN 1033

Snímač vibrací Monitran MTN/2200SM6 , SN 553380

Tyto snímače pak byly připojeny do Analyzátoru vibrací ADASH: A4400-VA 4, SN: 623260.

Jednalo se o snímače typu seismického a konkrétně o akcelerometry, které byly k měřeným objektům připojeny pomocí permanentního magnetu. Vzhledem k tomu, že pro zjištění základních vad se používá 1-1000Hz, nebude tedy problém s případnou rezonancí.

1.2 Signál a jeho zpracování pomocí FFT

Signál reprezentuje časový průběh fyzikálních veličin. Rozdělení signálu:

- **Deterministický signál** – signál, jehož časový průběh je determinován a proto lze jeho průběh předvídat

- **Stochastický signál** – náhodný signál – má v průběhu záznamu nepředvídatelný vývoj

- **Přechodový signál** – signál, který je časově omezen –např. hluk při přejezdu vozidla
Dále lze signál rozdělit podle náhodnosti jejich průběhu:

- **Periodický signál** – je složen z harmonických signálů o frekvencích, které jsou násobkem jedné základní frekvence. Z pohledu harmonického signálu lze mluvit o velmi širokém uplatnění v oboru kmitání a je obecně definován jako reálná časová funkce.

- **Kvasiperiodický signál** – signál rovněž složený z harmonických signálů s frekvencemi, které jsou násobky alespoň dvou základních frekvencí se vzájemným poměrem o velikosti, která je rovna iracionálnímu číslu.

- **Stacionární a nestacionární signál** – průběh signálu má ustálený – stacionární – charakter nebo se v čase mění – je nestacionární. Kritérium stacionárnosti za dlouhý časový úsek a nestacionární za krátký časový úsek [9].

1.2.1 Algoritmus FFT

Abychom ze signálu mohli získat jakékoliv informace je třeba ho rozložit na tzv. Fourierovu řadu. Jedná se o rozklad na harmonické funkce, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Pro obecné neperiodické funkce se používá rychlá Fourierova transformace neboli FFT (Fast Fourier Transformation).

Úkolem FFT je primárně rozklad na fourierovu řadu, a to periodických a kvasiperiodických signálů. Princip FFT spočívá v přepočtu pomocí algoritmu DIT (decimace v čase), který byl vytvořen Cooleyem a Tukeyem.[11]

1.2.2 Měření a vyhodnocování spekter signálů

Jelikož je třeba, aby signál pro FFT byl v nekonečné smyčce, je třeba použít tzv. časových oken pro úpravu hodnoty časového průběhu na začátku a na konci, aby signál začínal a končil ve stejném bodě. Používá se několik časových oken, mezi ty nejzákladnější patří: Hanning, Flat Top a Rectangular. Nejvýhodnější jsou ovšem Hanning a Flat Top, jelikož oba začínají, ale i končí na nule. Ovšem Flat Top časové okno jde i do záporných hodnot. Proto se jako nejrozšířenější časové okno u analyzátorů používá Hanning při FFT.

1.3 Zhodnocení vibrací, zásady volby měřících míst

Cílem měření by měla být analýza vibrací, podle které se dá určit jaké má stroj problémy. Z této analýzy by jsme měli dostat jakousi posloupnost, která by vypadala takto: Zjištění vznikající poruchy (detekce) → určení vadné součásti (lokalizace) → stanovení příčiny poruchy (proaktivnost) → určení délky zbylé životnosti (predikce).

Co se týče umístění snímačů, obecně platí, že by se měly nacházet co nejblíže k ložiskům, tedy nejlépe na samotném ložiskovém domku. Což nemusí být vždy možné.

Je proto lepší zvolit více měřených míst. Může nás to pak vést k určení správného místa pro měření. Základní zásady pro volbu měřicího místa:

- je třeba umístit snímač na bezpečném a dostupném místě
- je třeba umístit snímač na tuhém místě tak, aby nedocházelo k falešným vibracím na nedobře upevněných krytech apod.
- dodržují se základní postupy tak, abychom snímač případně nepoškodili. Tedy opatrně bokem přikládat snímač na měřené místo, aby se snímač silným klepnutím náhodou nepoškodil (hlavně u snímačů s permanentním magnetem)
- umístění měřících směrů by mělo být jasné dáno, aby šlo měření opakovat
- provádění měření za chodu stroje, nikoliv za doběhu nebo rozběhu stroje
- volit místa ve kterých by mohlo docházet k poškození a opotřebování [9]

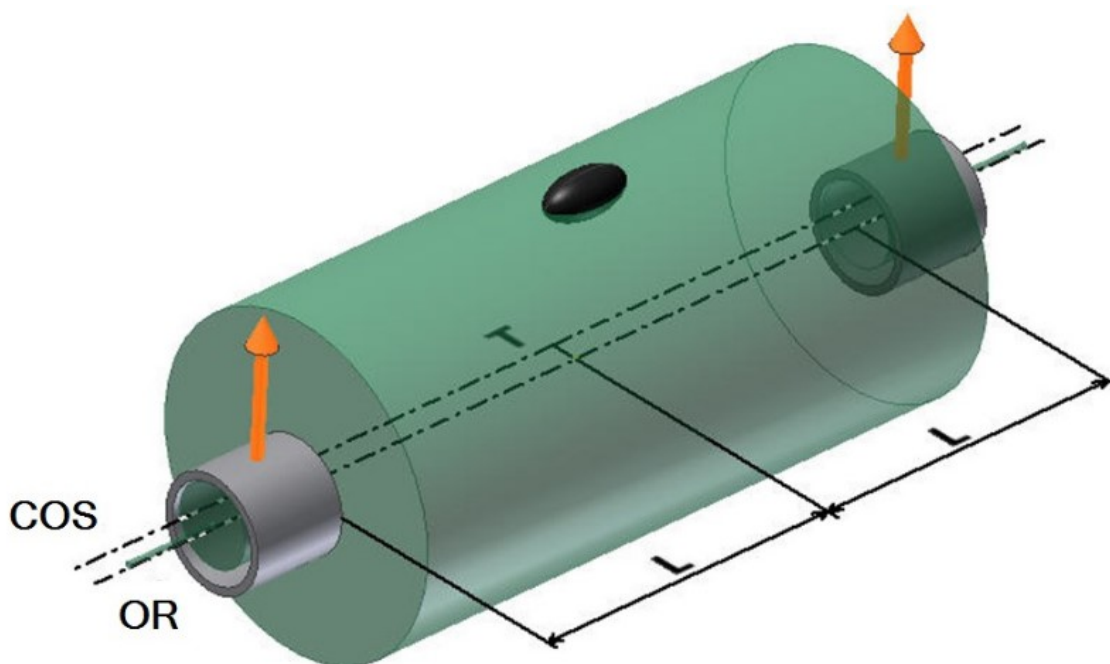
2 Diagnostika závad

Tato část bude v podkapitolách rozdělena na jednotlivé závady a obecně bude popsáno jak tyto závady rozlišit a stanovit z frekvenčních spekter. Nebudeme se zde zabývat závadami, které se nemohou uskutečnit na našich skutečných měřených strojích. Pro náš problém to je zbytečné.

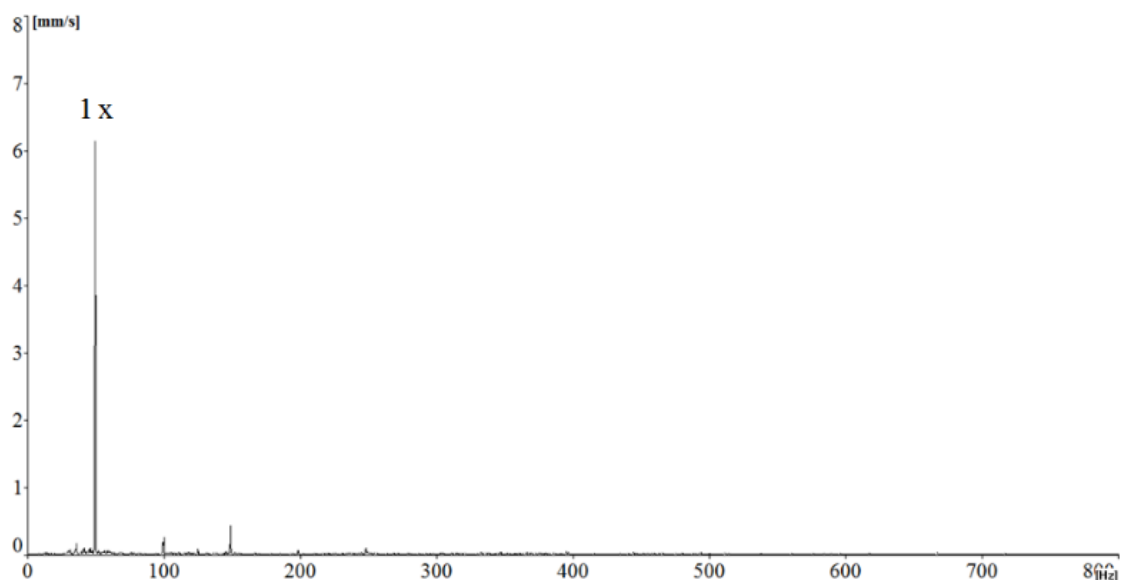
2.1 Statická, momentová a dynamická nevyváženost

Nevyváženost je jedna z nejčastějších závad v praxi. Tato závada má v praxi sinusový průběh a objevuje se jako otáčková frekvence. I ostatní závady mohou mít společné vysoké vibrace ve frekvenčním spektru, ovšem nabývají vyšších vibrací i v dalších harmonických frekvencích.

- statická nevývaha – má stejnou fázi, první harmonická frekvence vysoce převažuje ostatní frekvence ve spektru. Velikosti nevývahy zjistíme rovnou z amplitudy při měření na ložiskových domcích. Jak lze na obrázku níže vidět, jedná se o amplitudu s nulovým nebo malým fázovým posunem. Osa rotace (OR) a centrální osa setrvačnosti (COS) jsou sobě rovnoběžné, ale vzájemně od sebe posunuté.

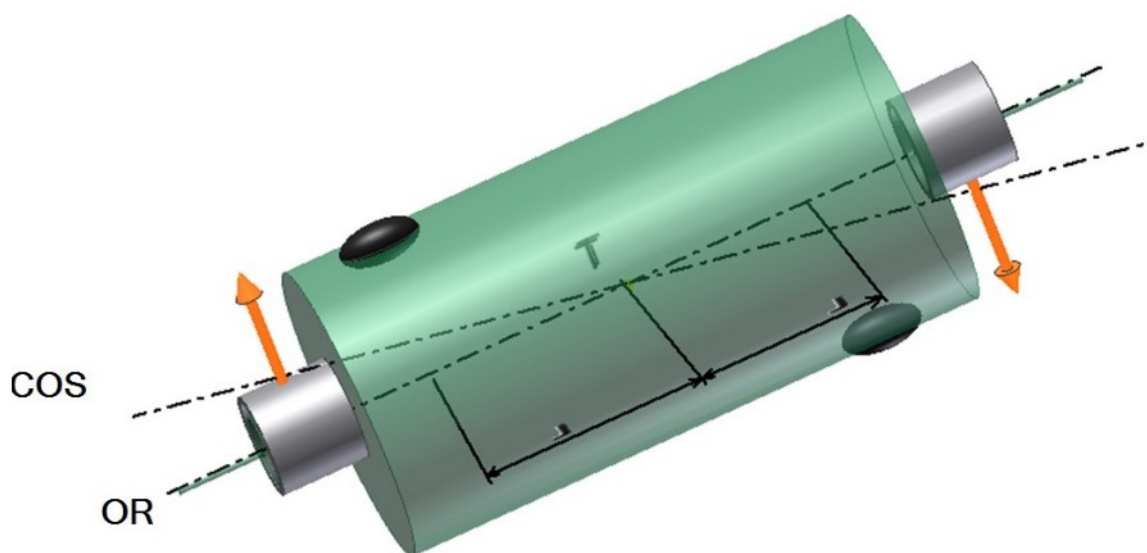


Obr.3 Statická nevývaha¹⁰



Obr.4 Frekvenční spektrum pro statické a momentové nevývahy¹⁰

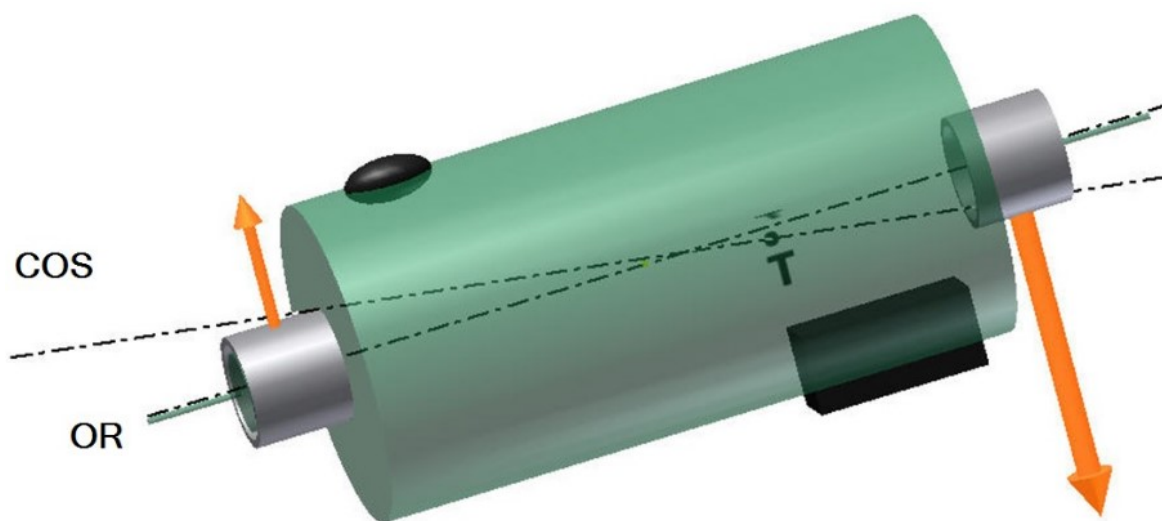
- momentová nevývaha – tato nevývaha má tendenci být fázově posunuta o 180° na stejné hřídeli. Taktéž jako u statické nevývahy, dominuje i v tomto případě první harmonická frekvence (otáčková), což lze vidět na obrázku frekvenčního spektra výše. Co se týče obrázku uložení jsou OR a COS různoběžné, ale protínají se v těžišti. Nevývaha se projevuje pouze při pohybu.



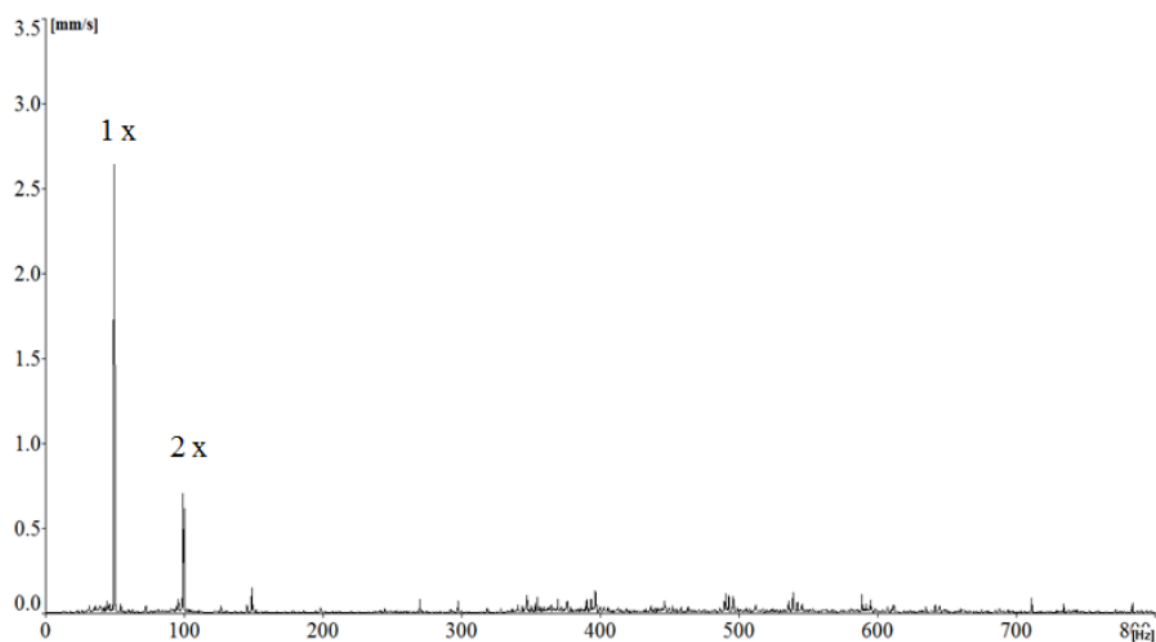
Obr.5 Momentová nevyváženost¹⁰

- dynamická nevývaha – v praxi se jedná o nejčastější výskyt nevývahy. OR a COS jsou různoběžné a navíc se neprotínají v těžišti. Projevuje se taktéž vysokou první

harmonickou frekvencí. Při velké nevyváženosti se mohou na druhé harmonické frekvenci objevovat vyšší hodnoty, jak je zobrazeno na obrázku níže. [10]



Obr.6 Dynamické nevývahy¹⁰



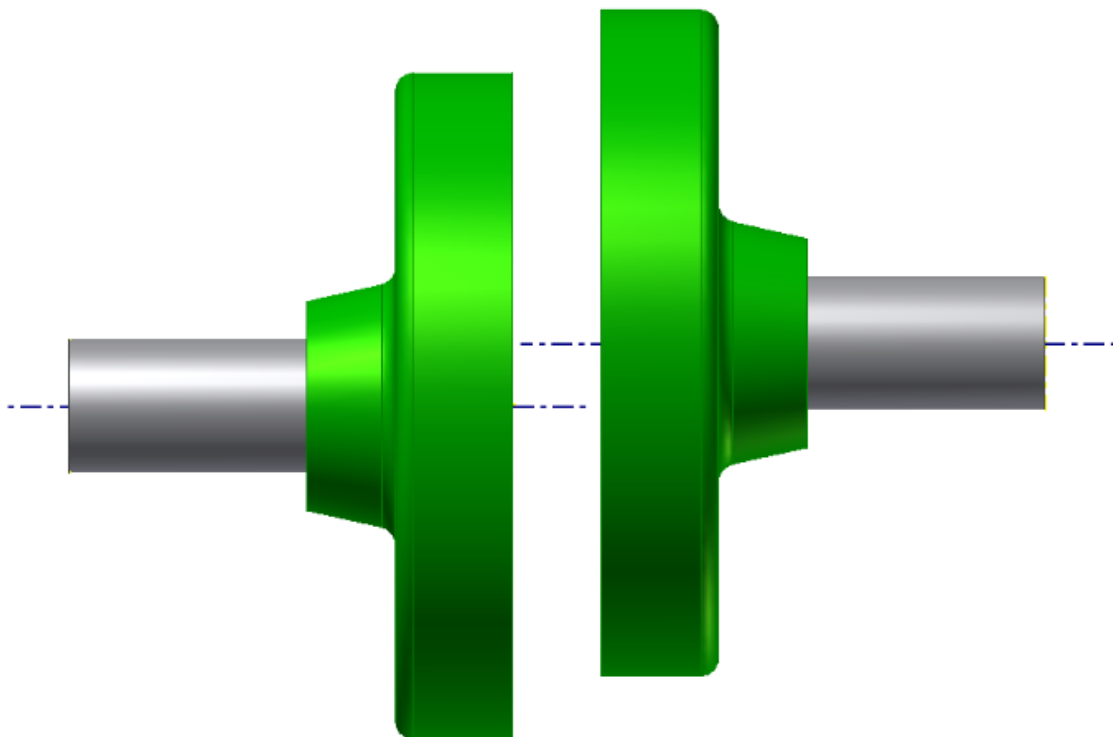
Obr.7 Frekvenční spektrum dynamické nevývahy (první a druhá harmonická frek.)¹⁰

2.2 Úhlová a osová nesouosost

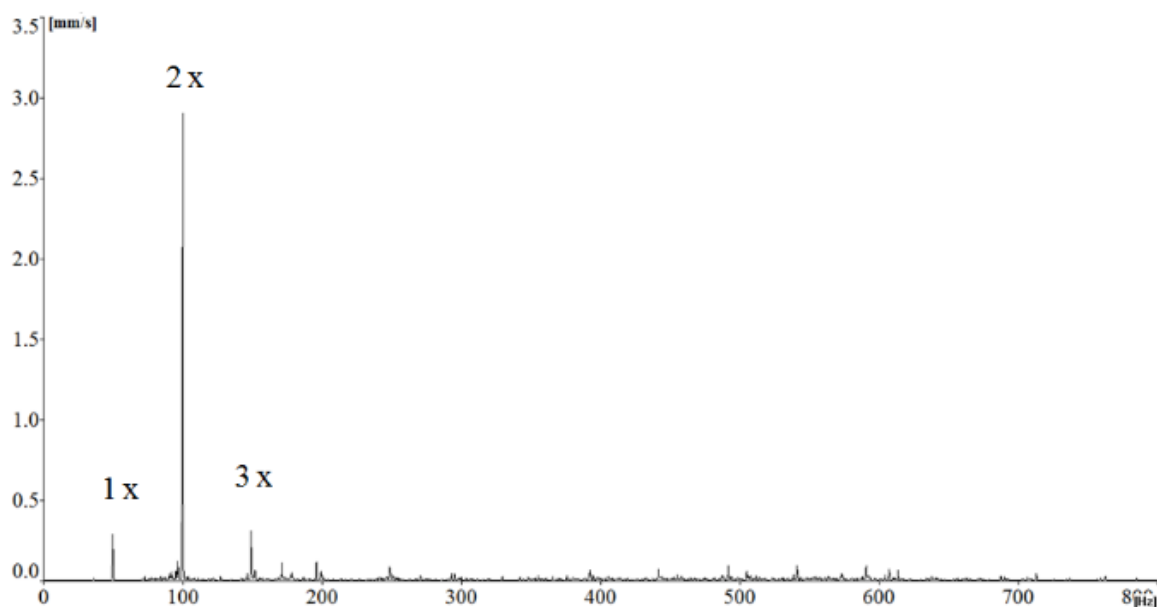
Pro správné konstrukční spojení je třeba spojek. Zavedením tohoto členu do soustavy pak může mít za vinu nesprávné ustavení společných os. Můžeme tedy mít rozdílný úhel mezi osami a nebo rozdílný vzájemný posun os.

Rovnoběžná nesouosost – jedná se tedy o rovnoběžně spojené hřídele, které jsou od sebe osově vzdálené. Tento rozdíl vyvolává namáhání spojky a dalších součástí. Vznikají

zde vysoké radiální vibrace. Druhá harmonická frekvence je často větší než první harmonická frekvence. Při příliš velkém přesazení vznikají pak vibrace i s čtvrtým a osmým harmonickým násobkem. Na obrázcích níže je vyzobrazena nesouosost společně s typickým frekvenčním spektrem.



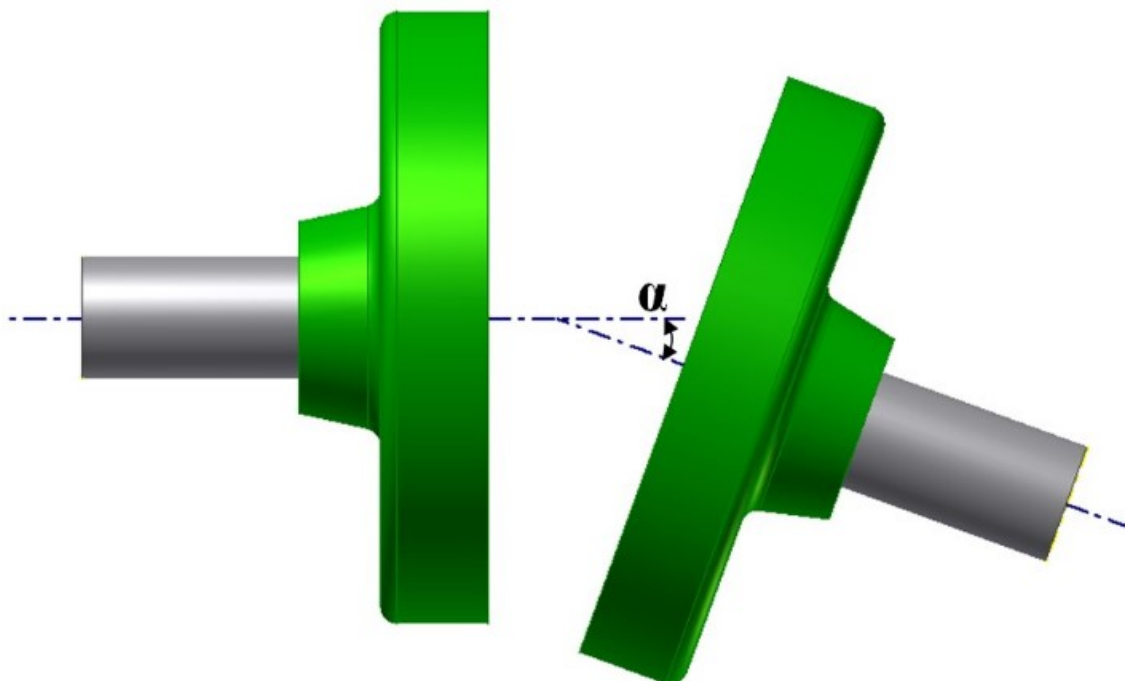
Obr.8 Rovnoběžná nesouosost¹⁰



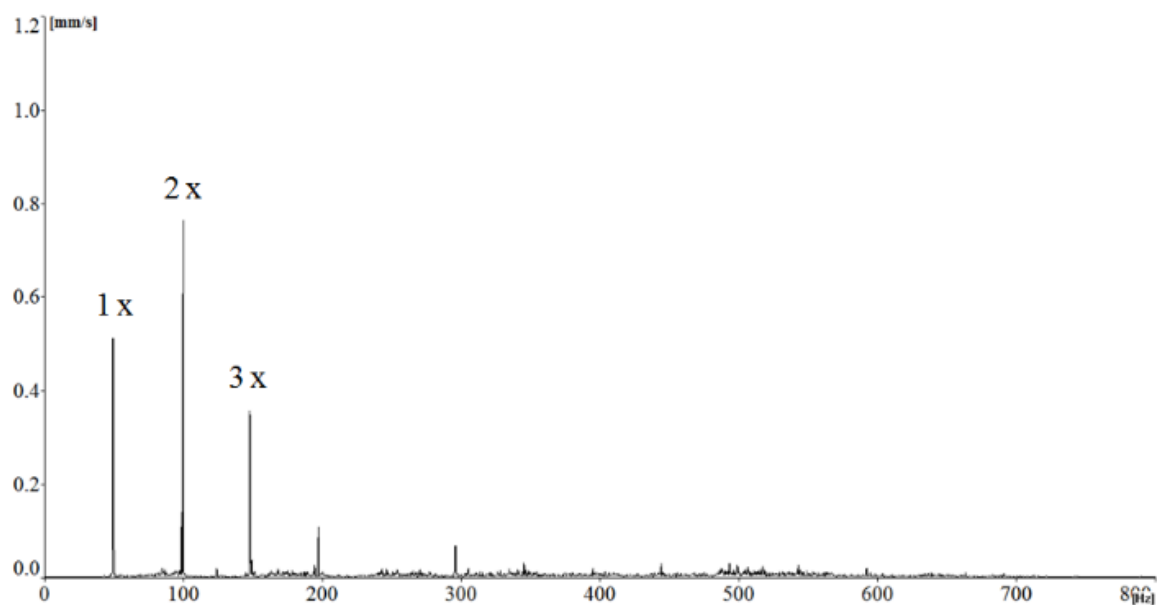
Obr.9 Typické frekvenční spektrum pro rovnoběžnou nesouosost¹⁰

Úhlová nesouosost – dochází při špatném ustavení, kdy obě osy se protínají, ovšem pod nějakým úhlem. Tím pádem v soustavě vznikají velké axiální vibrace, které se mohou

projevovat dominantní jak první tak i druhou, ale i třetí harmonickou složkou. Je zde fázový posun oproti stranám, a to o 180° . Na obrázku níže je znázornění nesouososti a typické frekvenční spektrum. [10]



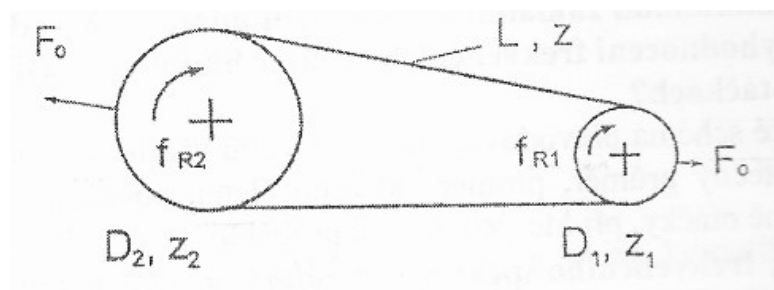
Obr.10 Úhlová nesouosost¹⁰



Obr.11 Typické frekvenční spektrum pro úhlovou nesouosost¹⁰

2.3 Řemenové převody

Vzhledem k tomu, že v našem praktickém případě je jako převod na jednom motoru použit řemen, je třeba zmínit, jak se vypočítá řemenová frekvence. Další možnosti jako volný řemen, nesouosost řemenice, nebo také projev rezonance řemene se projeví právě na oněch vypočtených frekvencích.



Obr.12 Řemenový převod⁹

Řemenová frekvence:

$$f_B = \frac{\pi \cdot D_1}{L} \cdot f_{R1} = \frac{\pi \cdot D_2}{L} \cdot f_{R2} \quad (1)$$

Zubová frekvence – ozubené řemeny:

$$\begin{aligned} f_{BZ} &= f_B \cdot Z \\ f_{BZ} &= f_{R1} \cdot Z_1 = f_{R2} \cdot Z_2 \end{aligned} \quad (2)$$

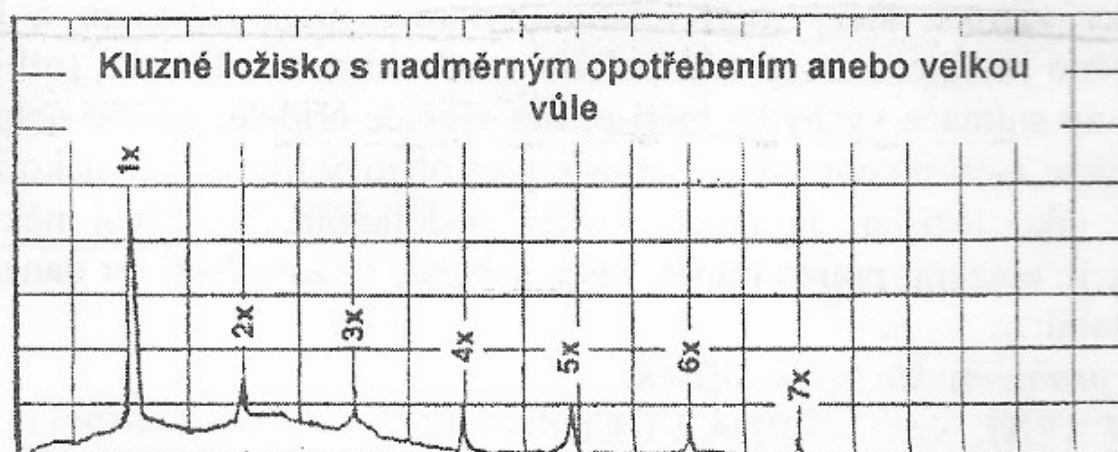
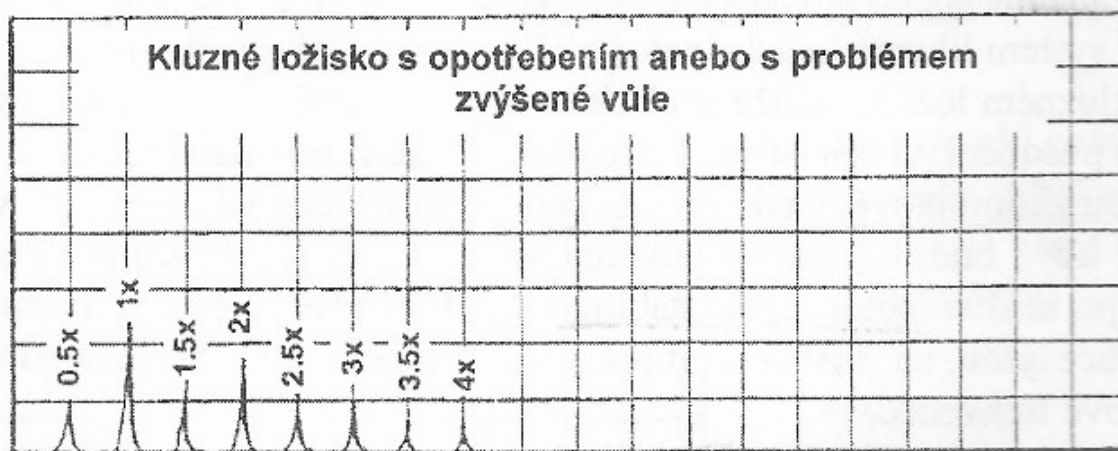
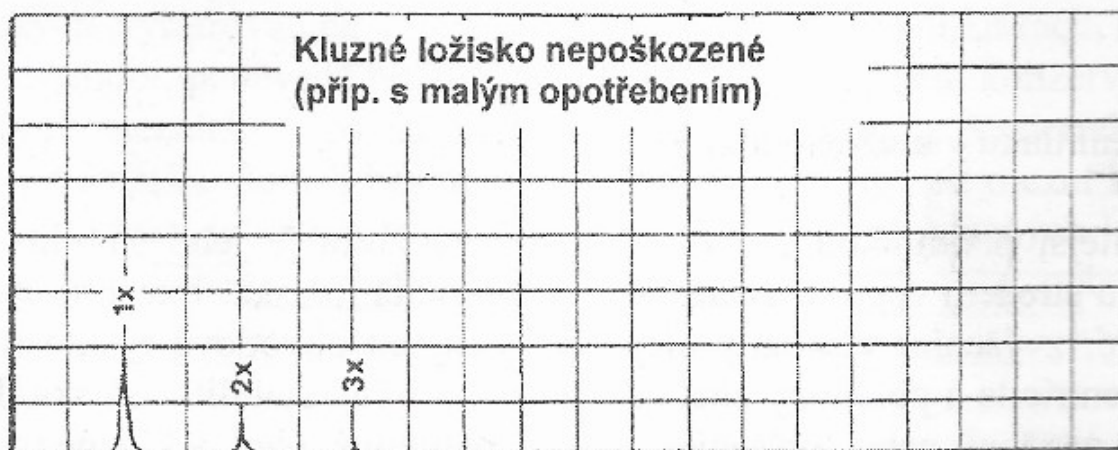
Vlastní frekvence řemene f_0 závisí na L a F_0

- zpravidla $f_B < f_{R2}$
- ve spektru často dominantní 2. f_B , také 3. f_B , 4. f_B
- neustálené amplitudy někdy pulsující s f_{R1} nebo f_{R2}

2.4 Kluzná ložiska

Taktéž kluzná ložiska jsou součástí rotačních strojních zařízení. Oproti valivým ložiskům jsou méně používané. Mezi základní problémy kluzných ložisek patří:

- **opotřebení, nadměrná vůle** - kluzné ložisko by se mělo pohybovat v určité radiální vůli. Malá vůle způsobí zhoršené mazání. Velká vůle se projevuje jako nelinearita.



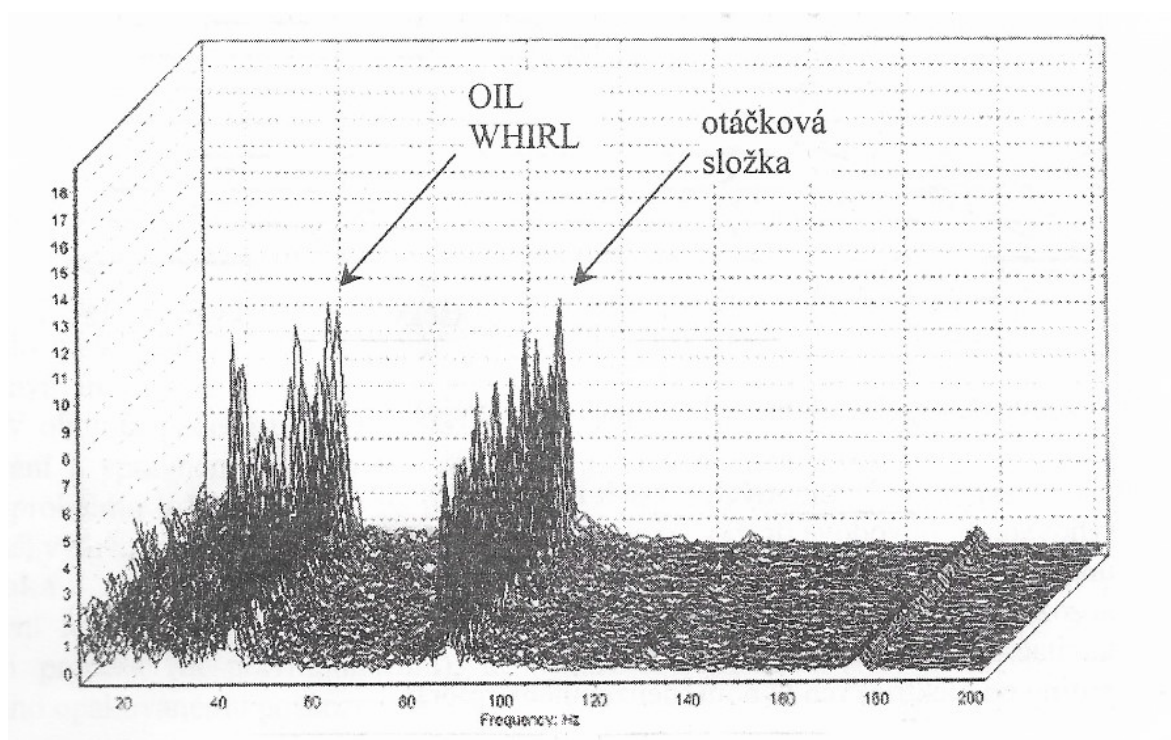
Obr.13 Vrchní - malé opotřebení, střední – zvýšená vůle, dolní – vysoké opotřebení

- **nestabilita oleje - oil whirl** – je to jeden z nejčastějších problémů kluzných ložisek. Tato nestabilita oleje se projevuje při 0.40 – 0.48 RPM (Revolutions Per Minute – otáčky za minutu). Za vznik této nestability můžou:

- nízké zatežující síly

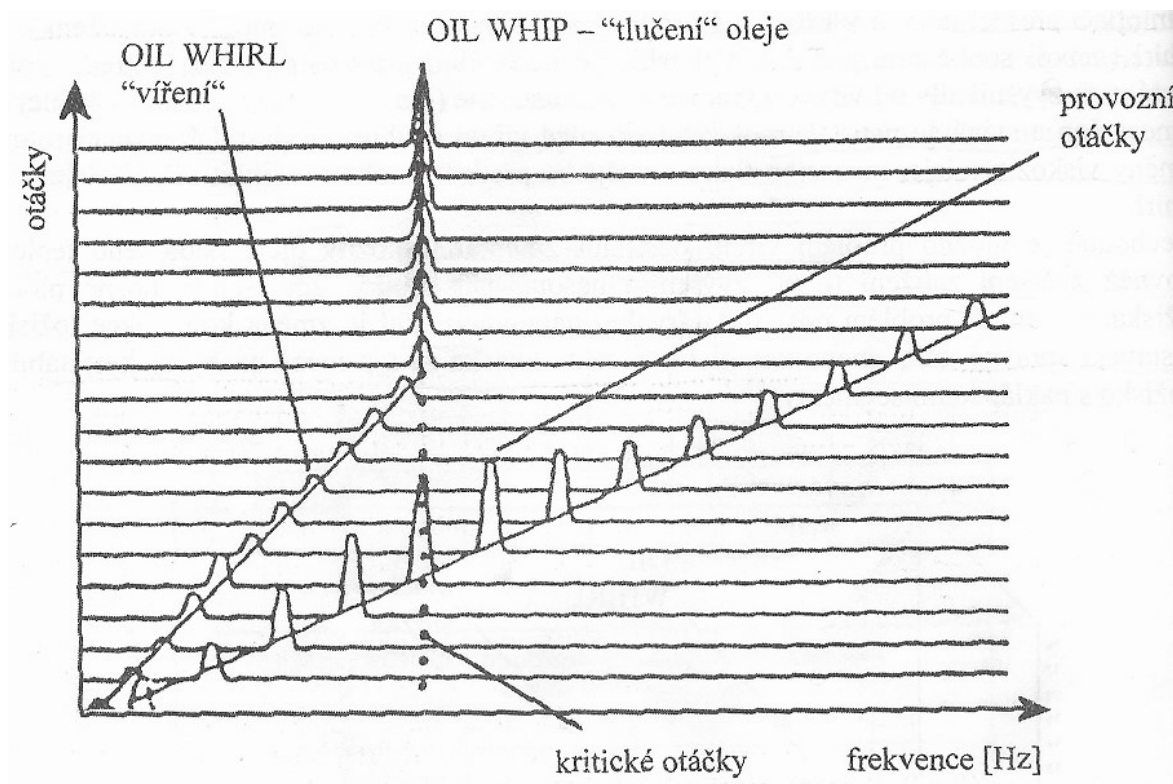
- výrazné opotřebení, nebo vysoká vůle
- změna viskozity oleje
- snížení nebo zvýšení tlaku oleje a jeho teploty
- změna vnitřního tlumení

Víření oleje je případ, kdy olejový klín tlačí hřídel dokola v ložisku. Síla v otáčení způsobí víření - oil whirl. Změny tlaku, teploty a viskozity oleje mohou ovlivnit víření oleje. Tento problém lze odstranit pomocí změny viskozity oleje nebo teploty. Větší zatížení může problém odstranit. Pokud problémy přetrvávají, je třeba změnit konstrukci ložiska, nastavit správnou vůli ložiska a nebo ložisko vyměnit za úplně jiný typ, který není tak náchylný k víření.



Obr.14 Frekvenční spektrum při víření oleje (Oil Whirl)⁹

- nestabilita oleje - oil whip – tento problém nastává, když se stroj dostává na nebo nad dvojnásobek kritické otáčkové frekvence. Tento problém vznikne, když se víření oleje dostane do dvojnásobné kritické frekvence. Olejový film již neunes nadměrné vibrace a dojde k zafixování na kritické frekvenci. Tento stav nezmizí ani při neustálém navyšování otáček. Jedná se o velice nebezpečný jev, který může zapříčinit až destrukci ložiska. [9]



Obr.15 Frekvenční spektrum při tlučení oleje (Oil Whip)⁹

Další závady, které můžeme na ložiscích nalézt:

- rýhy – od vniknutých nečistot do kluzných ploch ložiska
- praskliny z nadměrného namáhání
- koroze z důsledku oxidačních složek oleje
- kavitační vibrace a erozivní opotřebení
- pitting

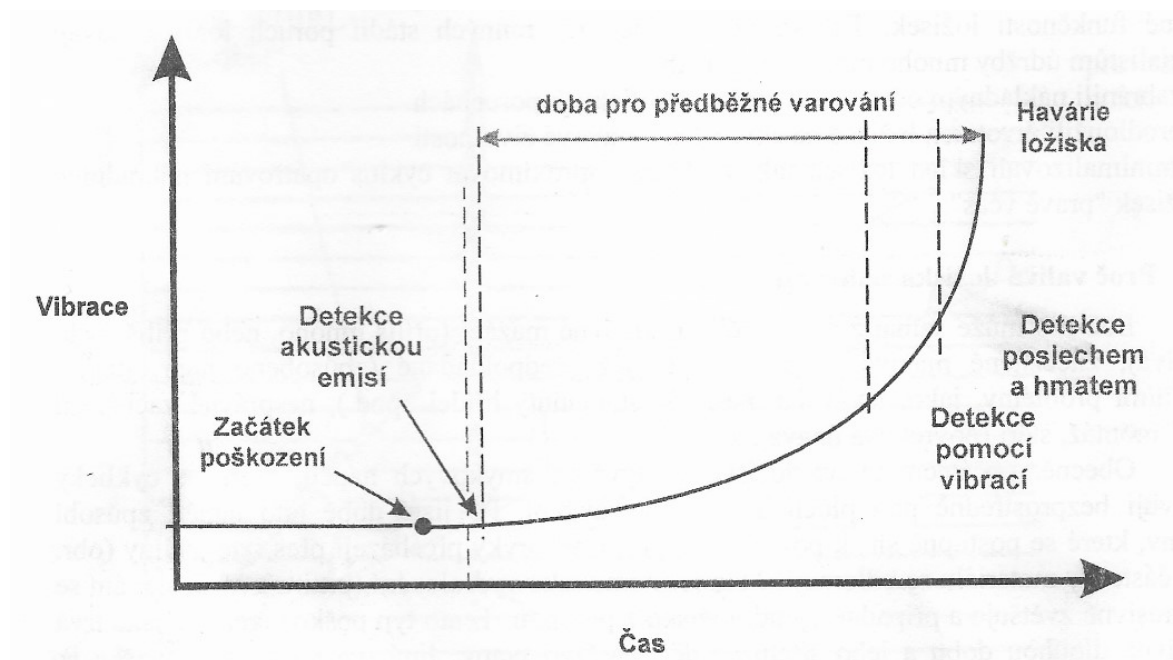
2.5 Valivá ložiska

Nyní tedy k nejrozšířenějšímu uložení rotačního pohybu. I přes použití nových technologií v konstrukci ložisek, se i přes zvyšující živostnost nedostaneme přes fakt, že v krátkém časovém intervalu může ložisko dojít ke katastrofické poruše. Vzhledem k tomu, že jedna z prvních poruch ložiska je odloupenutí nebo odštípnutí materiálu na valivých drahách, lze tyto problémy detekovat již v brzkých fázích a tedy předcházet poruchám ložisek, a předčasně a proaktivně hledat případné příčiny a lze si naplánovat údržbu. Tím pádem odstávka stroje bude plánovaná a nebude docházet k zbytečným prodlevám. Valivá ložiska mohou selhat z různých příčin, nejčastěji jsou to tyto:

- nesprávné mazání, ať už je maziva málo, nebo příliš
- znečištění maziva

- vyšší zatížení než předpokládané
- špatná montáž, stáří, atd.

První problém, který na ložisku vzniká souvisí se smykovým zatížením na dráze ložiska, které zapříčiňuje vznik prasklinek v materiálu. Při oběhu kuliček po dráze pak dochází k vylamování, vydrolování materiálu, tomuto se říká pitting. Tento problém se neustále zvětšuje až může dojít k poruše ložiska. Proto pomocí vibrodiagnostiky lze z vibračních signálů zjistit, jestli ložisko má začínající pitting. Což dá dostatek času údržbě, pro případnou výměnu a nebo pro zjištění příčiny. Pokud se tato příčina odstraní, značně se tím prodlouží životnost ložiska. Ale platí pravidlo, že i po vyměnění ložiska je potřeba zjistit příčinu vzniku pittingu na ložisku. Typický průběh poškození ložiska lze vidět na obrázku níže i s body, kdy lze tento problém detekovat.

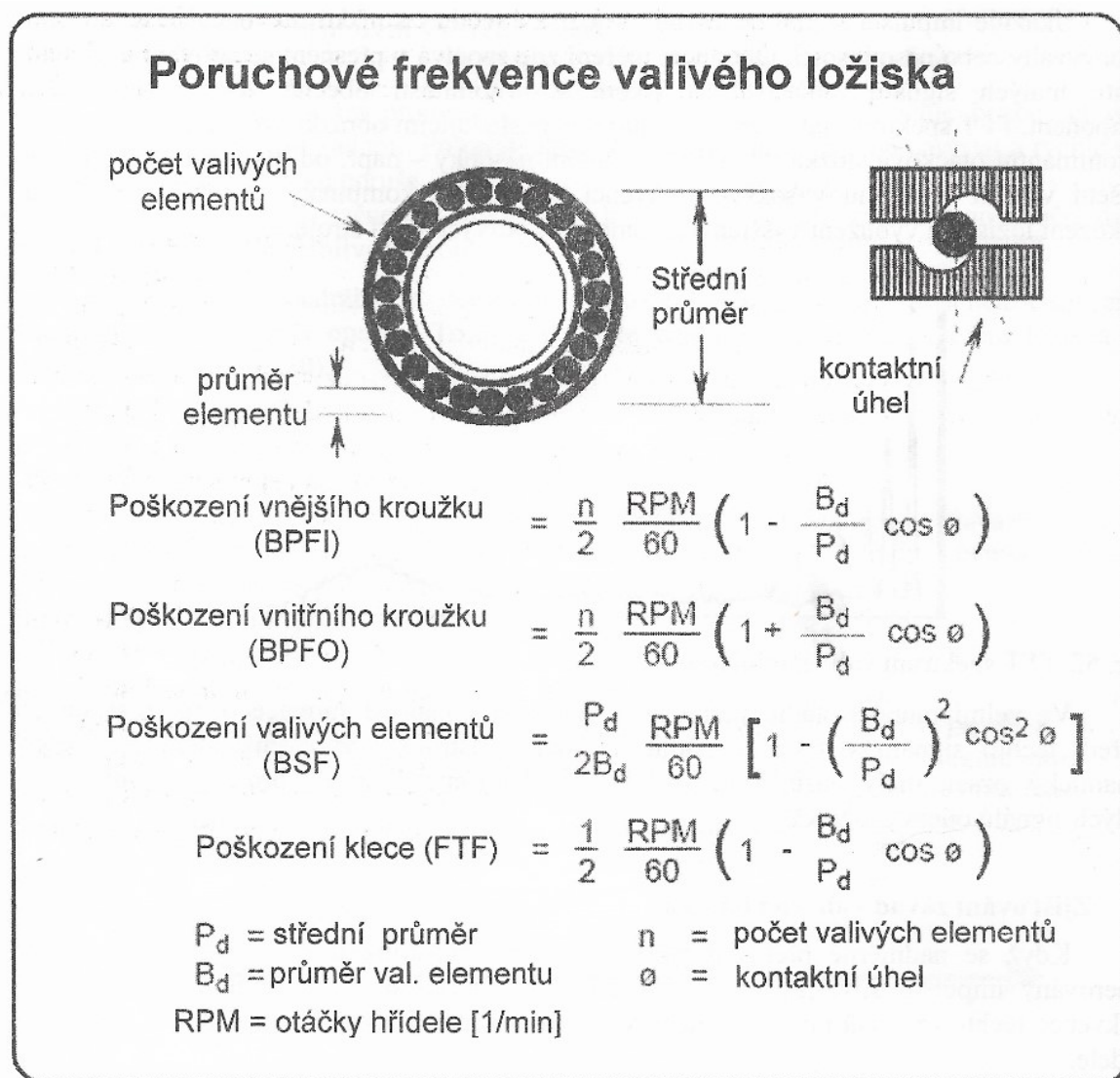


Obr.16 Typický průběh poškození ložiska⁹

První problém ale nastává při měření. I když může ložisko přenášet na ložiskový domek značné síly, je však odezva nosné konstrukce často malá. V počátcích poruchy jsou vibrace příliš malé a nejsou vidět přes měřený šum. Pokud by jsme chtěli takto nízké vibrace detekovat, bylo by třeba použít lepšího vybavení tak, aby byl šum co nejnižší a dynamický rozsah co největší společně s elektronikou pro zvýraznění těchto signálů.

Nyní tedy k zjišťování závady ložiska. Jelikož každý prvek rotuje v ložisku přes případnou nerovnost v povrchu dráhy, pak frekvence jsou spojeny s geometrií ložiska. Na

obrázku níže jsou rovnice pro frekvence závad. Ovšem tyto rovnice jsou ideální, jelikož předpokladem je, že kuličky budou pouze v ložisku rotovat a nebude zde žádný prokluz. To ovšem v praxi takto není a kuličky zároveň rotují a prokluzují. V rovnici se předpokládá, že vada na kuličce se za jednu otáčku dotkne vnější i vnitřní dráhy.



Obr.17 Poruchové frekvence valivého ložiska⁹

V počátcích problému je tedy těžké identifikovat problém. Jsou tedy užitečné další alternativní metody pro detekci poškození. Mezi ně patří: celkové hodnoty zrychlení, Spike Energy, HFD, Shock Pulse Meter, Crest Faktor, atd. Ne vždy určují tyto metody odkud problém pochází. Nemusí to totiž být poškození ložiska, ale vibrace čerpadla, rezonanční problém a další. Pro tento účel slouží obálka signálu zrychlení od společnosti SKF Condition Monitoring. Tato obálka slouží pro zvětšení a zvýraznění malých signálů. Ve zkratce se na signálu filtrují ložiskové signály. Protože by byly ale ztraceny v šumu, je

třeba použití simulace harmonické řady sinusových vln. Tímto nám pak zůstanou harmonické špičky ložiskové závady. [9]

2.6 Metoda Kurtosis

Jedná se o matematickou metodu, která má pomoci stanovit, zda-li ložisko začíná být poškozené. V principu jde o to, že nové ložisko pouze vydává jakýsi šum. Při začínajícím poškození se začnou ve spektru projevovat špičky. Tato metoda nám pak určuje v podstatě špičatost signálu, čili čím větší výsledná hodnota, tím více je ložisko poškozené. [10]

$$KA = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x-\bar{x})^4 \cdot P(x) dx}{\sigma^4} \quad (3)$$

x - amplituda signálu, \bar{x} - střední hodnota, $P(x)$ - pravděpodobnost (x), σ - standardní odchylka vůči nulovému signálu

Měření touto metodou prováděno ve frekvencích:

K1 2,5 - 5kHz,

K2 5 - 10kHz,

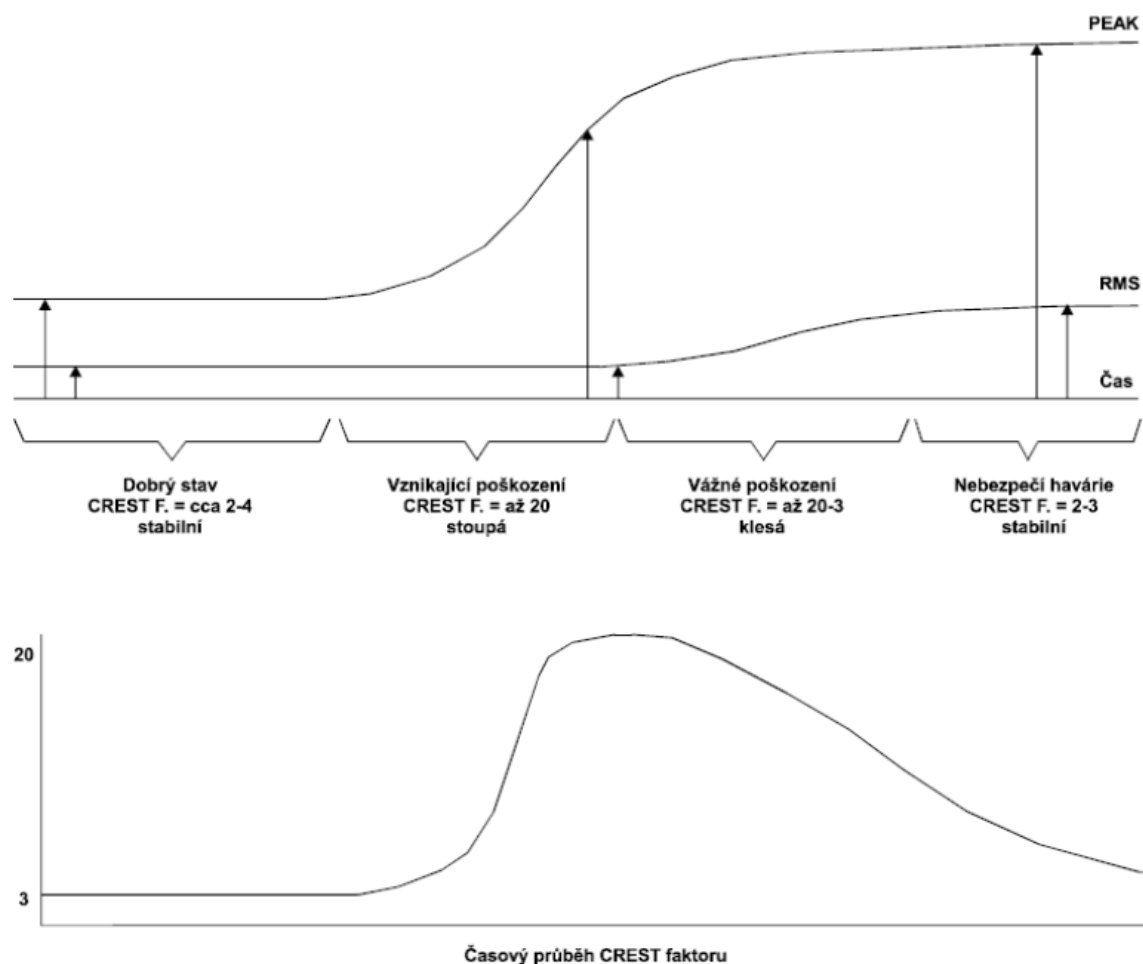
K3 10 – 20kHz,

K4 20 – 40kHz,

K5 40 – 80kHz.

2.7 Crest faktor

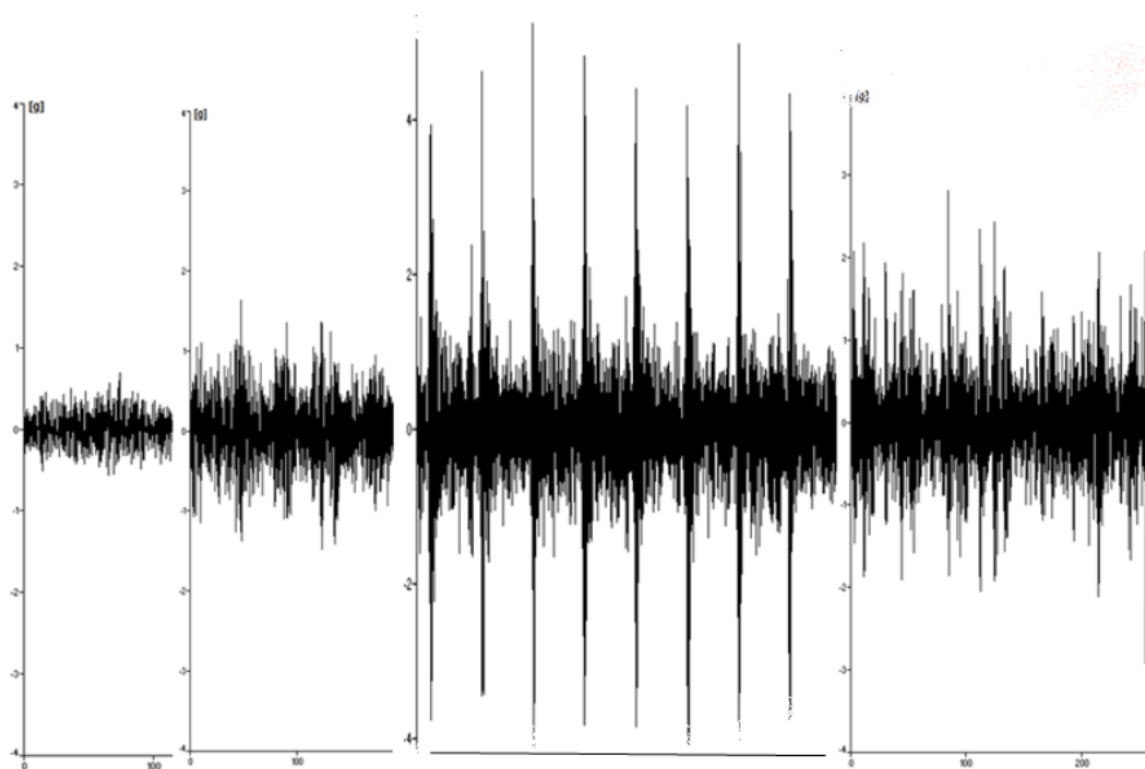
Taktéž slouží jako jednoduchá metoda pro zjištění technického stavu ložisek. Výpočet pro tento faktor je poměr PEAK/RMS hodnot. Tato metoda má výhodu, že lze odhalit brzké poškození ložiska, ovšem velkou nevýhodou je snižování hodnoty crest faktoru se zvyšujícím poškozením.



Obr.18 Průběh crest faktoru počas životnosti ložiska¹⁰

Z obrázku výše lze vidět jakým způsobem lze v počátcích detekovat vznikající problém na ložisku, kde se crest faktor začne zvyšovat. Postupně se ale hodnota crest faktoru s rozšiřujícím poškozením snižuje, až se zase ustálí.

Tato metoda se velmi hodí pro online monitoring systémů, jelikož od ostatních metod detekuje vznik trhlin daleko dříve, než ostatní metody, které teprve pro detekování nabíhají. Při začínajícím problému na ložisku vznikají ostré trhlinky. Tyto trhlinky se pak ve spektru ukazují jako špičky, kdykoliv kulička přes tuto nerovnost přejede. S postupem času se ale tyto špičkové hodnoty začnou snižovat. Důvodem je postupné zahlazování trhlinek. Mohou se však objevit další nové trhlinky, což se pak bude vykazovat jako výkyv špiček v záznamu. Toto zahlazování je znázorněno na obrázku níže z praxe. [10]



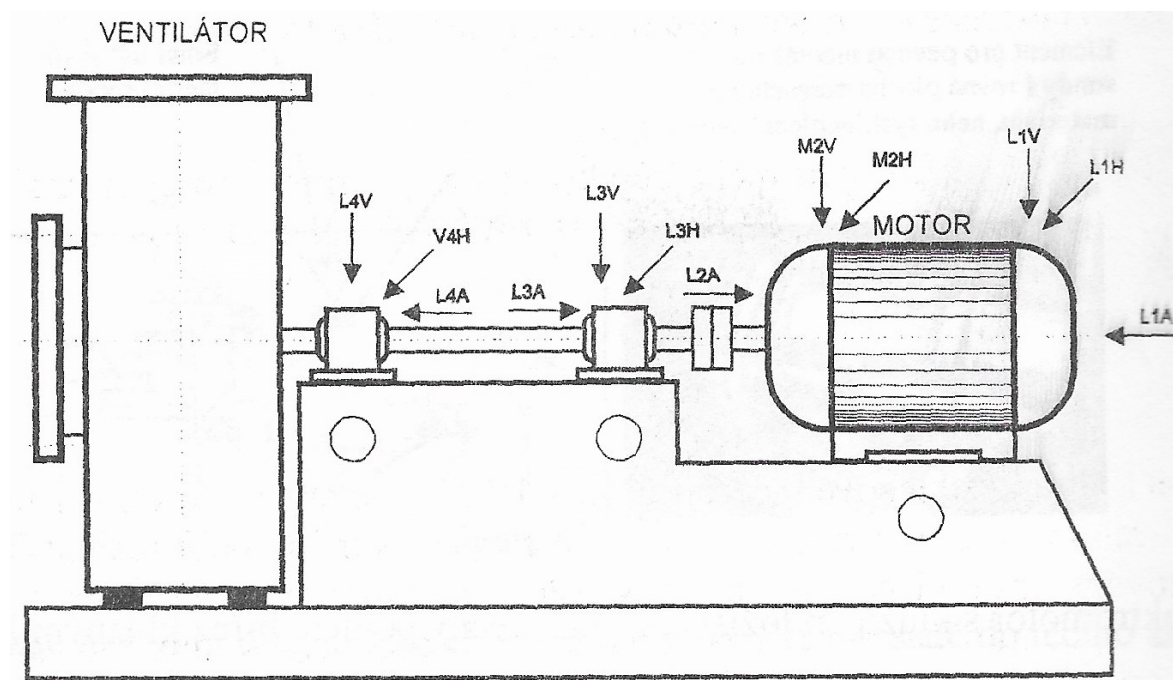
Obr.19 Vznik trhlinek a postupné zahlazení¹⁰

3. Vibrodiagnostika elektromotorů

V této kapitole bude podrobně popsáno jakým způsobem se ideální diagnostikují elektromotory. Jak již bylo zmíněno, zhodnocení stavu elektromotru, lze bezdemontážně zjistit pomocí vibrodiagnostiky. Pro správné zjištění stavu elektromotorů je třeba znát tyto technické údaje:

- počet otáček elektromotoru
- napájecí napětí elektromotoru U_n
- frekvence sítě
- počet pól párů
- počet drážek rotoru
- počet drážek statoru
- skluz a další

Taktéž zde platí stejná nebo obdobná pravidla pro zvolení měřicích bodů. Co nejbližše ložiskům, správné upevnění, vyznačení měřicích bodů pro opakovatelnost, apod. Na motorech většinou bývají daná měřicí místa, která jsou se závitem pro upevnění snímačů. Většina elektromotorů jsou magneticky vodivé, čili někdy není třeba používat šroubového spojení a stačí mít snímače s permanentním magnetem. Všeobecně pro měřicí místa lze použít příkladového schéma níže, s vyznačením měřicích bodů na soustavě.



Obr.20 Schéma měřicích bodů na systému ventilátor poháněný el. motorem⁹

Vibrace na elektromotoru mohou být způsobeny od mechanického původu - případy které byly vysvětleny v předchozích kapitolách. A nebo vibrace od elektrického původu, tímto původem se budeme zabývat v podkapitole.

3.1 Elektrické příčiny

Pro různé frekvence je možnost více příčin. Pro statickou změnu vzduchové mezery nebo zkratované statorové plechy, popřípadě proudovou nesymetrii je zřejmá frekvence a to dvojnásobek síťové frekvence, tedy:

$$f_{st} = 2 \cdot f_1 \quad (4)$$

- statická změna vzduchové mezery vzniká nesouosým uložením ložiskových stojanů rotoru elektromotoru nebo nesouosým uložením ložiskových štítů
- zkratování statorových plechů může nastat při špatné manipulaci s rotorem v době jeho vytahování ze statoru. Mechanickým otěrem o povrch statorových plechů dochází k jejich zkratování a tím k magnetickému zkratu v průběhu provozování elektromotoru
- proudová nesymetrie vzniká z titulu provozních závad v napájecí síti [9].

Další závady jako změna rotující vzduchové mezery, závit nakrátko na rotoru, zlomená rotorová tyč nebo zkratované rotorové plechy, se projevují na frekvenci, která se vypočítá takto:

$$f_{dyn} = f_0 \pm 2f_{sk} \quad (5)$$

- změna rotující vzduchové mezery je způsobena uvolněným rotorem na hřídeli
- poškození rotorových plechů, a to hlavně tepelným poškozením může dojít ke zkratování části plechů a tím k vytvoření nesymetrie, tzv. závit nakrátko. Vzniká také poškozením rotorového vinutí
- ke zlomení rotorové tyče dochází při rozběhu nebo při provozování v těžkých podmínkách [9]

Je třeba poukázat i na tyto vztahy mezi frekvencemi, otáčkami a skluzem:

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{f_1}{p} & n_2 &= \frac{t_2}{p} \\ f_2 &= s \cdot f_1 & n_2 &= n_1 - n \\ f_2 &= \frac{n_1 - n}{n_1} \end{aligned} \quad (6)$$

Zkratky:

f_{sk} - skluzová frekvence neboli frekvence rotoru

f_1 - frekvence sítě 50 Hz

n - otáčky motoru

s - skluz

p - počet pólů

n_1 - otáčky točivého pole statoru

n_2 - otáčky točivého pole rotoru

- statická změna vzduchové mezery nebo-li statická excentricita obsahuje kromě frekvence f_{st} složky frekvencí, které jsou závislé na počtu drážek a skluzu podle tohoto vztahu :

$$f_{drs} = f_1 \cdot \left[\frac{i \cdot m \cdot (1-s)}{p} \pm k_1 \right] \quad (7)$$

- dynamická změna vzduchové mezery obsahuje kromě frekvencí f_{dyn} také složku:

$$f_{dard} = f_1 \cdot \left[\frac{(i \cdot m \pm k_e) \cdot (1-s)}{p} \pm k_1 \right] \quad (8)$$

Zkratky:

i - 1, 2... číslo harmonické

m - počet drážek rotoru

k_1 - 0, 2, 4, 6...

k_e - stupně excentricity (pro statickou excentritu=0, pro dynamickou excentritu je celé číslo)

3.2 Další závady elektromotorů

Zkouška výkonu – vzhledem k tomu, že nový motor nebo motor po generální opravě nemusí být vždy v stoprocentním stavu, velmi často dochází k haváriím motorů. Zkouška výkonu je řízena podle předepsaných norem. Pro zkoušení výkonu se používá dynamometr. Při zkoušce dynamometrem se provádí tato měření:

- izolační stav za studena
- odpor cívek za studena
- proud ve fázích nakrátko

- zatížení na jmenovitý moment
- izolační stav za tepla
- odpor cívek vinutí za tepla

Zkratky v magnetických obvodech – projevují se nižším točivým momentem při jmenovitém proudu se snížením až 30%. Tento problém vzniká při poškození rotorových nebo statorových plechů. Poškozením plechů vzniká vzduchová mezera mezi plechy a tím pádem zde vznikají vířivé proudy. Magnetický tok ale zůstává konstatní.

Přerušené rotorové vinutí – u asynchronních motorů s kotvou nakrátko dochází k prasknutí zkratovacího věnce a důsledkem je snížení točivého momentu a k tomu zvýšené oteplení. Snížení momentu je zapříčiněno klesajícím magnetickým tokem a síly. Při zvýšené teplotě se namáhá izolace zvýšené roztažnosti rotorových tyčí, což může vést k rozpojení rotorového věnce a zničení elektromotoru.

Možné vzniky nesymetrie elektromagnetického pole – mezi možné příčiny patří: nesymetrie vzduchové mezery, přesycování zubů statoru a rotoru, nevhodný poměr počtu drážek, nevhodné natočení drážek, excentricita rotoru, uspořádání vinutí s několika paralelními větvemi, neharmonické napájení a další. V praxi byly zjištěny dvě hlavní příčiny pro nesymetrii – nesymetrie el. magnetického pole v důsledku bourání vinutí a nebo z důvodu nekvalitních plechů pro statory a rotory, které nejsou stejné tloušťky po celé délce a tudíž vytváří nesymetrii magnetického pole. [9]

4 Online monitoring

V této kapitole se budu blíže zabývat co znamená pojem online monitoring. Klasické provádění zhodnocení technického stavu jistého strojního systému bývá pomocí ručního přístroje s připojenými snímači. Vytvoří se vibrační záznam za chodu strojního zařízení a pak na počítači nebo i samotném analyzátoru lze zobrazit výsledné frekvenční spektra nebo kritické vibrace. Kdežto v dnešní moderní době lze tento zbytečně zdlouhavý a opakující proces nahradit pomocí online monitoringu.

Jedná se tedy o způsob zhodnocení technického stavu strojního zařízení za běhu, aniž by u stroje byla třeba jakákoliv obsluha. Všeobecný princip tedy je následující. Určí se, který stroj nebo jeho část je poruchově kritická a zvolí se měřicí body. Na tyto měřicí body se nejlépe šroubovým spojením připojí snímače vibrací (akcelerometry). Tyto snímače jsou dále připojeny na analyzátor, který je stále poblíž stroje, ale nemusí tak být. Přenos dat z tohoto analyzátoru pak lze udělat třemi způsoby.

- periodický výběr dat – nejjednodušší způsob jak data získat, a to samotným výběrem po uplynutí periodické doby. Například po týdnu/měsíci chodu stroje se připojí technik na analyzátor a data si přenesou do počítače, kde dojde k jejich vyhodnocení v programu. Tento systém bude z hlediska finančních možností nenáročný. Ovšem je zde riziko, že stroj právě po výběru dat začne mít potíže, které v současných datech být vidět nemusí.

- trvalé snímání dat – jedná se o kontinuální přenos dat, kdy nám data z analyzátoru neustále proudí do počítače, ve kterém vidíme současné hodnoty vibrací. Tento proces přenosu dat, lze ještě rozdělit na drátový a bezdrátový přenos. Drátový přenos znamená, že analyzátor je pevně spojen až k počítači pomocí drátu. Tedy je to levnější varianta než bezdrátový přenos. Ale drátový přenos má nevýhodu, právě onoho drátu, stroje mohou být umístěny přes celé haly a to může být problematické. Proto je zde i durhá varianta, a to bezdrátovou technologií. Použitím Wi-Fi vysílače připojeného k analyzátoru a poté Wi-Fi přijímače připojeného do počítače, získáme stejný kontinuální přenos dat jako u drátového přenosu.

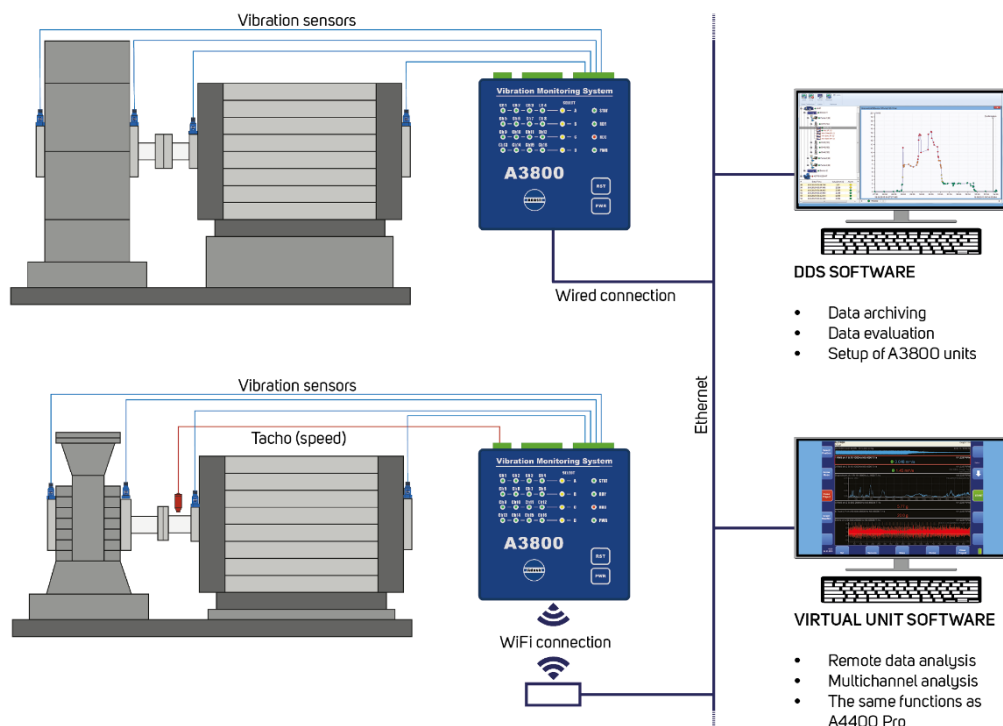
Dále lze tyto systémy rozdělit podle způsobu vybírání dat. Jelikož se všechny měření a data někde musí ukládat, je třeba množství těchto dat regulovat. Nejnáročnější tedy bude kontinuální přenos dat, které se budou neustále ukazovat jako aktuální. Další způsob, jak snížit množství uložených dat, je pomocí periodického odesílání. Tedy odeslaná data nebudou naprosto aktuální, ale např. s minutovou odezvou. Lze využít ovšem

kontinuálního měření, avšak data která se budou ukládat budou jen ta, jejichž hodnota se nějakým výraznějším způsobem zvýšila či snížila. Například pokud se hodnota zvýšila o 5% než předchozí naměřená hodnota, tak se tato hodnota uloží. Nemusí to být pouze 5% rozdíl, dají se použít i 10% a 20% rozdíly. Ovšem s čím vyšším rozdílem, tím více se nám výsledná křivka zkresluje pokud by jsme například viděli data z chodu motoru za jeden den.

V dalších podkapitolách se pokusím rozebrat jednotlivé firmy, které se věnují online monitoringu, včetně cenového srovnání a výběru nejlepšího systému. Celkově je mnoho firem, které se tímto zabývají, proto budu hodnotit jen tyto tři: Adash, Brüel Kjaer a SKF.

4.1 Adash Online Monitoring systémy

Adash nabízí pouze tři analyzátory pro online monitoring. Jedná se o jednokanálový typ, poté čtyř až šestnáctikanálový typ a poslední šestnáctikanálový typ. Nejlépe by stačil pouze čtyřkanálový pro jeden motor. Ovšem takové Adash nevyrábí, proto volím jakožto analyzátor Adash A3800 4-16 Kanálový Analyzátor. Výhodou je i vysoká kompaktnost a možnost připojení i TACHO pro snímání rychlosti otáček. Jakožto snímače bych volil Adash Ac-102-1A, jedná se o akcelerometry, které by byly připojeny pomocí permanentního magnetu. Zvolená místa pak odpovídají nejvyšším naměřeným hodnotám ze všech měřících míst. Tímto zabezpečíme pokrytí celého systému. Měřící body na motoru, kde se dají snímače přišroubovat, tedy proto nevolím, jelikož nejvyšší vibrace se u všech motorů nacházely co nejbližší ložiskům a nebo přímo na ventilátoru, kde vzniká nánosem nevyvaha. Tímto pak můžeme předcházet vysokému nánosu nečistot a případným vibracím. Obrázek níže pak ukazuje, jak by mohl být realizovaný měřící systém.



Obr.21 Schéma zapojení monitorujícího systému ADASH

Připojení lze tedy provést pomocí dvou způsobů drátově a bezdrátově. Vzhledem k tomu, že prostory kde se nacházejí pece s motory v praxi jsou velké, volil bych tedy metodu bezdrátového přenosu. I přes fakt, že bezdrátový systém zase nemá takovou vzdálenost, aby mohl vysílat přes celou halu. Stačilo by ale mít přijímací systém někde na hale tak, aby přijímal data od analyzátoru a pak už stačí dovést data do kanceláře. Nebo druhou možností by bylo vytvořit v hale prostor, kde by byl počítač s přijímačem a mohly by se zde data stahovat a rovnou kontrolovat. Tento systém pak vyžaduje mít počítač nainstalovaný se systémem DDS pro správné nastavení celého systému a pozdější kontrolu a ukládání naměřených dat.

Co se cenové stránky týče, tak tento systém by obsahoval devět snímačů, tři analyzátory, tři vysílače, jeden přijímač, počítač a další příslušenství. Cena jednoho snímače je řádově okolo čtyř tisíc korun českých. Cena analyzátoru není na internetovém webu zobrazena a ani po kontaktování společnosti mi nebyla cena sdělena, budu tedy odhadovat, že jeden analyzátor by byl v cenové relaci dvaceti tisíc korun českých. Odhadovaná cena za wi-fi vysílače a přijímače, budu uvažovat šest tisíc korun českých. Pokud analyzátor již rovnou nebude vybaven vlatním wi-fi vysílačem. Cenu za příslušenství беру maximálně do pěti tisíc korun, tato částka bude u všech systémů stejná.

Celková odhadovaná cena za online monitorující systém od ADASH by tedy byla 107 000,- Kč.

4.2 Brüel Kjaer Online Monitoring Systémy

Taktéž i výrobce Brüel Kjaer má více variant pro monitorování stavu strojních systémů. Ze třech možných variant, zase volím tu nejvhodnější pro náš praktický případ. Jedná se o analyzátor VDAU – 6000, jak v předchozím případě se jedná o šestnácti kanálový analyzátor, který má ovšem mnohem více funkcí oproti např. analyzátoru od ADASH. Tedy tento analyzátor obsahuje nejen vstupy na snímače vibrací, ale obsahuje i vstupy pro snímače teplot a ještě vstupy pro snímače polohy. Samotný analyzátor je dále vybaven pro detekci vířivých proudů v pumpách a kompresorech, klasické mechanické problémy jako jsou nevyvážení, nesouost, špatné ukotvení, rezonance, problémy s elektrickým motorem a další. Dále přístroj měří v širokopásmovém i krátkopásmovém poli, což je ideální pro měření a zjišťování závad na převodovkách, pásové stroje a stroje s rotujícími ložisky. Skvělou vlastností je i jednoduchá instalace. Vše je nastaveno tak, aby se pouze připojily sensory a přístroj je již automaticky nastaven na jaký stroj bude připojen a tím pádem se eliminuje možnost špatného nastavení nezkušeným personálem, atd. Analyzátor používá tyto měřící metody:

- senzor polohy a jeho napětí podle naměřené mezery
- oběhové rychlosti, harmonické, oběh zubu/čepele, atd.
- vektory – rychlosti vibrací a posunutí fáze
- obálky – detekce problému ložiska
- tachy – rychlost/fáze a reference

Další výhodou tohoto analyzátoru je adaptivní monitoring, dle výrobce dokáže tento analyzátor detekovat vznikající problémy již v prvních fázích, aniž by vznikaly falešné upozornění, například během změny rychlosti a zátěže, které často ovlivňují již tak úzký limit pro upozornění při brzké detekci. Tento výrobek pak lze použít ve dvou formách:

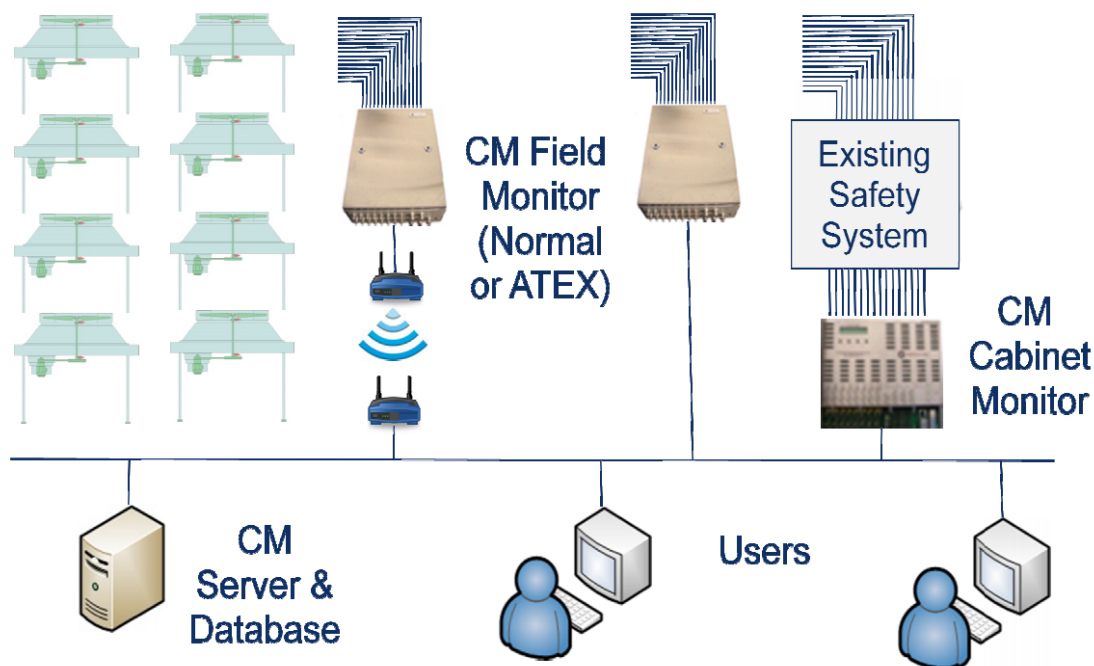
Monitorující stanice:

- zobrazuje naměřená data
- zobrazuje informace o změnách a upozorněních
- poskytuje pozornost pro zaměstnance ohledně událostí a alarmech

Diagnostická stanice:

- obsahuje časově závislé křivky z nahrávek
- umožňuje post-procesní a analýzu čistých vstupních dat

Zde je zobrazena možnost zapojení toho systému, jak je uvedeno na jejich produktovém informačním dokumentu.



Obr.22 Schéma zapojení monitorujícího systému Brüel Kjaer

Aby se mi lépe porovnávaly jednotlivé systémy z firem mezi sebou, budu i zde uvažovat o použití bezdrátového systému přenosu dat. Co by tedy obsahoval tento systém. Bylo by třeba zase třech analyzátorů, devíti akcelerometrů přesněji tedy snímač 4391 od stejnojmenné firmy, tři vysílače, jeden přijímač, počítač a příslušenství. Tedy cena za jeden takový snímač se pohybuje až ve výši dvacetpět tisíc korun českých, cenu za analyzátor jsem opět na jejich webu, ani nikde jinde nenašel, ale vzhledem k cenám snímačů, budu brát jako odhadovanou cenu za jeden analyzátor sto tisíc korun českých. Cena za wi-fi přijímače a vysílače bude taktéž považována šest tisíc korun českých, cena za příslušenství bude taktéž stejná, tedy pět tisíc korun českých. Celkově by se tedy systém od Brüel Kjaer vyšplhal až na obrovských 536 000,- Kč. Tato cena bohužel nebude přesná, ovšem již samotné snímače od firmy jsou pěti násobně dražší než běžné snímače např. od firmy ADASH. Brüel Kjaer také poskytuje mnohem menší sensory, které jsou spíše používány pro modální analýzu, ale s jejich velikostí a nízkou odolností by se nedaly

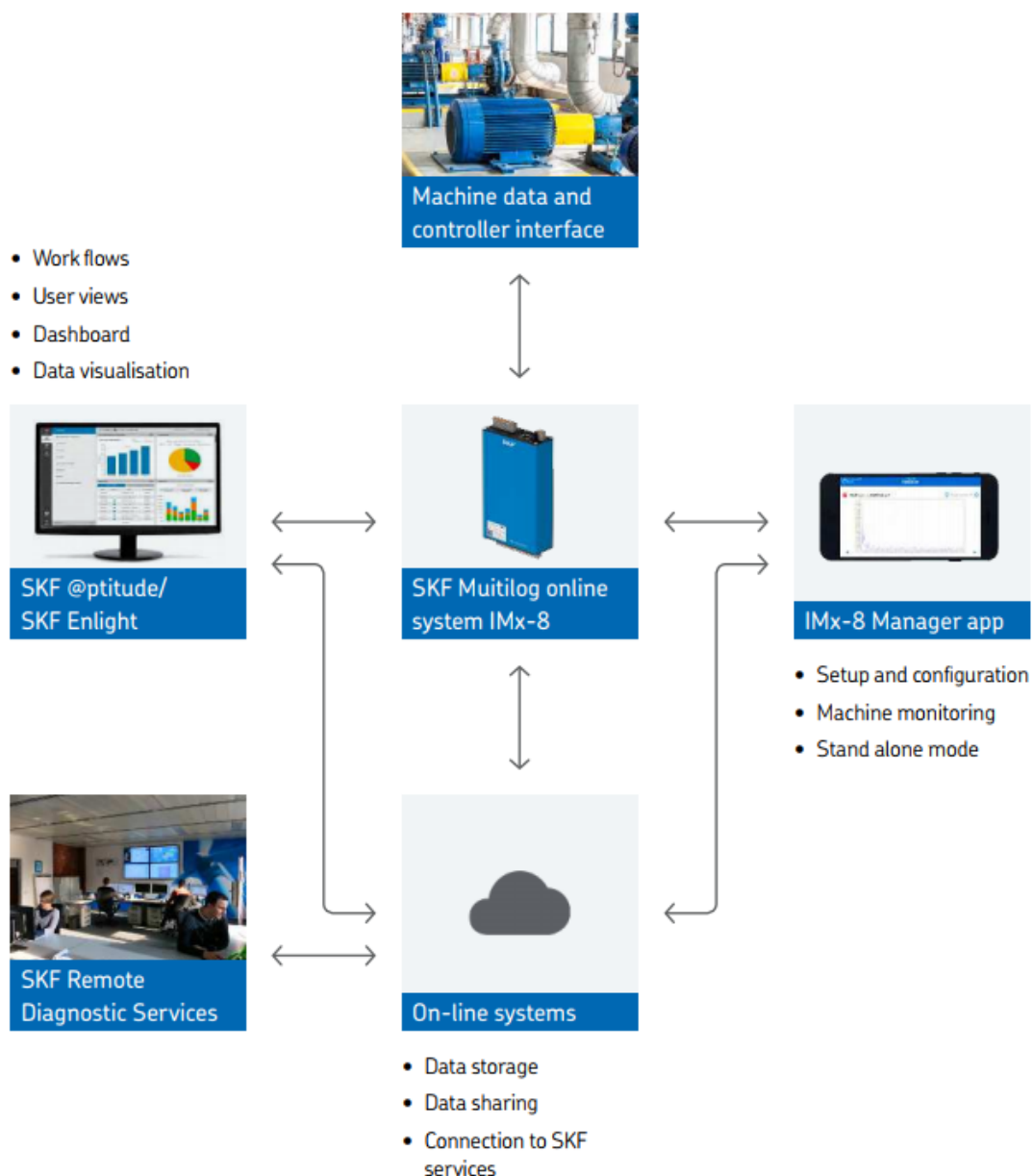
aplikovat do prostředí našeho případu. Odhadovaná cena analyzátoru se odvíjí od pětinasobného rozdílu ceny mezi snímači Brüel a ADASH.

4.3 SKF Online Monitoring Systémy

Taktéž firma SKF, nabízí spoustu možností pro online monitoring. Z cca řady 10 systémů které nabízí, se mi zalíbil SKF Multilog On-line System IMx-8. Ostatní modely byly spíše pro velkokapacitní, nebo pro příliš znečištěná místa. Co všechno tento systém obsahuje:

- 8 vstupů pro snímače DC a další 2 pro měření rychlosti
- vnitřní paměť o velikosti 4GB, podle jejich slov tato paměť vydrží pro roční měření
- detekce náhlého zastavení/problému stroje
- bluetooth funkce pro sdílení dat přes mobilní telefony
- prediktivní úlohy pro včasnou detekci začínajících problémů

Tento analyzátor od firmy SKF, mě zaujal kompaktní velikostí, vnitřní pamětí, tím pádem ani není třeba mít počítač a používat wi-fi pro přenos dat. Jelikož druhou skvělou vlastností je správa dat pomocí bluetooth. Stačí tedy, aby pověřená osoba měla mobilní telefon a data si může kdykoliv stáhnout do zařízení a poté si je zobrazit na počítači. Samozřejmě lze systém zapojit i klasicky jako předchozí systémy od konkurenčních firem s možností i přes cloudové spojení a nebo drátově a bezdrátově. Na obrázku níže, je od výrobce ukázán možný systém propojení a monitoringu.



Obr.23 Schéma zapojení monitorujícího systému SKF

Nyní tedy k cenové stránce. Taktéž pro porovnání budu uvažovat stejně jako v předchozích případech. Tedy tento systém by obsahoval zase devět akcelerometrů, vybral jsem SKF CMSS 2100 pro běžné použití. Dále bude součástí tři analyzátorů, tři vysílače, jeden přijímač, počítač a příslušenství. Tedy cena analyzátoru taktéž není nikde uvedena a pouze podle podobných systémů v pře-prodeji odhaduji cenu analyzátoru na dvanáct tisíc korun českých. Snímače se pohybovaly s cenou okolo sedmi tisíc korun českých. Dále cena za wi-fi přijímače a vysílače bude taktéž považována šest tisíc korun českých, cena za příslušenství bude taktéž stejná, tedy pět tisíc korun českých. Celkově by se tedy celková cena tohoto systému dostala na 110 000,- Kč. Tento systém by mohl být

ještě levnější, pokud by se využívalo přenesení dat pomocí právě zmiňovaného bluetooth, což by ale bylo možné jistým způsobem zařídit i u konkurenčních systémů.

4.4 Doporučený Online monitoring systém

Z těchto tří systémů je téměř jasné, že systém od Brüel Kjaer je příliš drahý pro danou aplikaci v praxi. Sice má několik výhod od systému ADASH, bohužel tyto výhody by v praktickém případě příliš nenašly využití. A vzhledem k tomu, že cena je tak vysoká za pořízení systému, tak by ani pořizující firma s takovou částkou nesouhlasila, alespoň ne pro takové malé uplatnění. Co se týče zbylých dvou systémů, tak cenově se téměř neliší. Ovšem mne zaujal právě systém od SKF svou kompatibilitou a svou jedinečnou bluetooth funkcí.

Nyní by šlo ze systémů ADASH a SKF poskládat jeden systém, který by byl ještě levnější. Pro tento systém by se tedy použilo akcelerometrů od ADASH, tedy přesněji Ac-102-1A a jako analyzátor by byl použit systém od SKF, přesněji tedy SKF Multilog On-line System IMx-8. Pokud by se tedy vybírala data přímo z analyzátorů a nebylo by třeba jiného přenosu, pak by tedy celková částka za tento systém klesla na 77 000,- Kč. Co se týče kompatibility, mezi ADASH a SKF, oba sensory používají dvou pinové zapojení, takže by neměl být problém. Ještě bych chtěl upozornit, že ceny se mohou lišit od skutečnosti, jelikož firmy si nacení svoje zakázky a samotné ceny analyzátorů mi nebyly sděleny.

Tab.10 Cenové rozdělení jednotlivých systémů

Výrobce	Celková cena	Poznámka
ADASH	107 000,- Kč	Kvalitní systém, dobrá cena
Brüel Kjaer	536 000,- Kč	Vysoká cena, vysoká kvalita
SKF	110 000,- Kč	Kompaktní, dobrá cena, kvalita
Kombinace	77 000,- Kč	Spojení ADASH/SKF zlepšení ceny

Ještě je třeba správně zvolit ve kterých měřicích místech se budou snímače teoreticky nacházet. Vzhledem k tomu, že první dva motory vykazovaly nejvyšší hodnoty vibrací na měřicích bodech L2, budu volit tyto měřicí body jako výchozí. Všeobecně sice platí, aby měřicí místa byla co nejbližší ložiskům. Ovšem takto z měření ložisek by z obou prvních motorů nebylo patrné, jestli nastává nějaký problém. Vyjímkou tedy bude třetí motor, jelikož je přímo od motoru připojen k ventilátoru. A nejvyšší naměřené body tedy byly

v bodech L3, což je přímo na ventilátoru. Proto bych volil měřící body v těchto místech, kde bude zřejmě nejčastější příčina vibrací a to nevyvaha.

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

UTAJENÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

5 Závěr

V této práci bylo pouze teoreticky vysvětleno co je vibrodiagnostika a způsoby měření, vyhodnocování a zásady při měření elektromotorů. Bylo zde popsáno o termínu Online Monitoring a způsoby použití v praxi. Zbytek praktické části práce je kvůli režimu utajení vymazán a nezveřejněn.

6 Seznam použité literatury

Online zdroje:

- [1] ADASH, *Online monitoring system A3800* [online]. 2018 [14.4.2018] Dostupné z: <https://adash.com/online-monitoring-system/a3800>
- [2] ADASH, *Adaptive Algorithm of Data Acquisition* [online]. 2018 [14.4.2018] Dostupné z: <https://adash.com/adaptive-algorithm-data-acquisition>
- [3] TEquipment, *Adash Ac-102-1a* [online]. 2016 [14.4.2018] Dostupné z: <https://www.tequipment.net/Adash-America/AC-102-1A/>
- [4] Brüel Kjaer, *BPI0037 EN-12 16-Channel Condition Monitoring System*, [online]. 2018 [citace: 14.4.2018] Dostupné z: https://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/Product_Information/Condition_Monitoring/VDAU-6000/Product_Information_VDAU_6000_EN.pdf
- [5] Brüel Kjaer, *Accelerometer Type 4391*, [online]. 2018 [citace: 14.4.2018] Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4391>
- [6] SKF, *Online Monitoring – I* [online]. 2018 [citace: 22.4.2018] Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/condition-monitoring/surveillance-systems/on-line-systems/monitoring-systems/index.html>
- [7] SKF, *SKF Multilog On-line System IMx-8* [online]. 2.2017 [citace: 22.4.2018] Dostupné z: http://www.skf.com/binary/21-289842/SKF-IMx8_Brochure_PUB-CM_P2-17174-EN.pdf
- [8] TEquipment, *SKF CMSS 2100 Industrial accelerometer* [online]. 2016 [citace: 22.4.2018] Dostupné z: <https://www.tequipment.net/SKF/CMSS-2100/General-Accessories/>

Knižní zdroje:

- [9] HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80-248-0650-9
- [10] BLATA, J. – JURASZEK, J.: *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka*. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5
- [11] TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7
- [12] KREIDL, M. – ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. Ben – technická literatura, Praha 2006, 1. Vydání, 408 s., ISBN 80-7300-157-6

7 Seznam obrázků, tabulek a vzorců

Seznam obrázků:

- Obr.1 Tlakový akcelerometr [10]
- Obr.2 Smykový akcelerometr [10]
- Obr.3 Statická nevývaha [10]
- Obr.4 Frekvenční spektrum pro statické a momentové nevývahy [10]
- Obr.5 Momentová nevyváženost [10]
- Obr.6 Dynamické nevývahy [10]
- Obr.7 Frekvenční spektrum dynamické nevývahy (první a druhá harmonická frek.) [10]
- Obr.8 Rovnoběžná nesouosost [10]
- Obr.9 Typické frekvenční spektrum pro rovnoběžnou nesouosost [10]
- Obr.10 Úhlová nesouosost [10]
- Obr.11 Typické frekvenční spektrum pro úhlovou nesouosost [10]
- Obr.12 Řemenový převod [9]
- Obr.13 Vrchní - malé opotřebení, střední – zvýšená vůle, dolní – vysoké opotřebení [9]
- Obr.14 Frekvenční spektrum při víření oleje (Oil Whirl) [9]
- Obr.15 Frekvenční spektrum při tlučení oleje (Oil Whip) [9]
- Obr.16 Typický průběh poškození ložiska [9]
- Obr.17 Poruchové frekvence valivého ložiska [9]
- Obr.18 Průběh crest faktoru počas životnosti ložiska [10]

Obr.19 Vznik trhlinek a postupné zahlazení [10]

Obr.20 Schéma měřících bodů na systému ventilátor poháněný el.motorem [9]

Obr.21 Schéma zapojení monitorujícího systému ADASH

Obr.22 Schéma zapojení monitorujícího systému Brüel Kjaer

Obr.23 Schéma zapojení monitorujícího systému SKF

Seznam tabulek a grafů:

Tab.1 Vliv připevnění snímače [9]

Tab.2 Doporučené hodnoty rychlosti vibrací v pásmu 10-1000Hz

Tab.3 Doporučené hodnoty zrychlení vibrací v pásmu 500-25000 Hz (Vedoucí práce)

Tab.4 Zobrazení naměřených hodnot na elektromotoru ABB ve všech měřených místech

Tab.5 Zobrazení naměřených hodnot na elektromotoru KEM EU ve všech měřených místech

Tab.6 Zobrazení naměřených hodnot na elektromotoru VEM ve všech měřených místech

Tab.7 Zobrazení naměřených hodnot na elektromotoru ABB ve všech měřených místech měření č.2

Tab.8 Zobrazení naměřených hodnot na elektromotoru KEM EU ve všech měřených místech měření č.2

Tab.9 Zobrazení naměřených hodnot na elektromotoru VEM ve všech měřených místech měření č.2

Tab.10 Cenové rozdělení jednotlivých systémů

Seznam rovnic:

(1) Rovnice pro řemenovou frekvenci [9]

(2) Rovnice zubové frekvence [9]

(3) Rovnice Kurtosis [10]

(4) Rovnice dvojnásobku síťové frekvence [9]

(5) Rovnice dynamické vzduchové mezery [9]

(6) Rovnice mezi frekvencemi, otáčkami a skluzem [9]

(7) Rovnice pro ostatní frekvence statické vzduch mezery [9]

(8) Rovnice pro ostatní frekvence dynamické vzduchové mezery [9]

8 Seznam příloh

Příloha CD

1. Bakalářská práce v pdf